



Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TREBALL FINAL DE GRAU

TÍTOL: ESTUDI PRELIMINAR D'UN COL·LECTOR D'ENERGIA
PIEZOELÈCTRIC EXCITAT PER FORCES MAGNÈTIQUES PER AL
MEDI MARÍ

AUTOR: Roca Rubí, Álvaro

DATA DE PRESENTACIÓ: Gener, 2016

RESUM

El projecte realitzat tracta sobre l'estudi i la possibilitat de millora d'un col·lector d'energia piezoelèctric per al medi marí amb l'objectiu d'alimentar dispositius de baix consum.

Els estudis efectuats durant el transcurs del projecte seran dividits en dos apartats:

1. Estudi de la millora de l'aprofitament de l'onatge marí per aconseguir més energia.
2. Estudi i experimentació de la excitació de piezoelèctrics mitjançant forces magnètiques.

Per efectuar els estudis preliminars descrits, un nou dispositiu de col·lector d'energia ha estat dissenyat seguint les característiques d'anteriors projectes.

Els canvis efectuats en l'enginy han estat els següents:

El moviment del prototipus estudiat està basat en el moviment d'un pèndol horitzontal que inicia el seu moviment gràcies al moviment de les ones del mar. Per millorar el gir del pèndol i, per tant, aprofitar millor l'energia provinent del mar, s'ha dissenyat un nou dispositiu amb el qual es poden efectuar diferents configuracions amb imants, per tal d'aprofitar les forces magnètiques i fer el gir del pèndol més homogeni i amb més velocitat.

En els prototipus de col·lectors construïts prèviament, l'excitació dels piezoelèctrics era efectuada per xoc aprofitant el moviment del pèndol. En el present projecte s'ha realitzat l'estudi i l'experimentació d'efectuar la deformació del piezoelèctrics amb la força del camp magnètic produït per imants. S'han estudiat el pics de voltatge, la potència i l'energia capturada en les deformacions produïdes del piezoelèctric durant les proves efectuades i s'ha comparat amb anteriors projectes.

Paraules clau (màxim 10):

Col·lector d'energia	Magnetisme	Piezoelèctric	Pèndol
Velocitat de Gir	Energia Capturada	Onatge Marí	

ABSTRACT

The carried out project concerns the study and the possibility of improving a piezoelectric energy harvester for the marine environment with the aim of feeding low-power devices.

The studies conducted during the course of the project will be divided into two different sections:

1. The study of the improvements resulting from the utilization of ocean waves in order to obtain more energy.
2. The study and experimentation of the piezoelectric by magnetic forces.

In order to carry out preliminary studies described, a new device of energy harvester has been designed following the characteristics of previous projects.

Changes made on the device are as follows:

The movement of the studied prototype is based on the motion of a horizontal pendulum which begins its movement thanks to the movement of the waves. To improve the pendulum rotation and thus to make a better use of the energy from the sea, a new device has been designed in which we can incorporate different magnet configurations, in order to take advantage of the magnetic forces and make the rotation of the pendulum more homogeneous and faster.

In the prototypes of energy harvesters constructed previously, the deformation of piezoelectrics was performed through shock using the motion of the pendulum. In this project we have carried out the study and experimentation necessary to make the deformation of the piezoelectric by the utilization of the magnetic field produced by magnets.

The voltage peaks, power and captured energy produced during the tests involving the piezoelectric have been studied and compared to previous projects.

Keywords (10 maximum):

Energy Harvester	Magnetism	Piezoelectric	Pendulum
Turning speed	Captured Energy	Ocean waves	

Índex de Continguts

1. Introducció	9
2. Objectius	10
3. Antecedents.	11
3.1. WaveRoller	11
3.2. Archimedes Waves Swings (AWS).	12
3.3. bioWAVE.	13
3.4. Col·lector d'energia mitjançant piezoelèctrics de vibració.	14
4. Energy Harvesting.	17
5. Fonaments dels imants.	21
5.1. Funcionament del imants.....	21
5.2. Camps magnètics i forces entre imants.	23
6. Piezoelèctrics.....	27
6.1. Tipus de materials piezoelèctrics	28
6.2. Aplicacions de la piezoelectricitat	28
7. Caracterització del moviment del pèndol.....	30
8. Disseny i construcció del dispositiu.	33
8.1. Part mòbil del dispositiu.	34
8.1.1. Muntatge de les parts.	35
8.2. Part fixa del dispositiu.....	37
8.2.1. Muntatge de les parts.	40
8.3. Suport per la taula de proves.	43
8.3.1. Muntatge del suport.	43
9. Caracterització dels imants empleats.	45
10. Experimentació: Tests de gir.....	48
10.1. Tests en la taula de proves.	48
10.2. Test de gir 1.....	49
10.2.1. Configuració del prototipus 1.....	49
10.3. Test de gir 2.....	54
10.3.1. Configuració del prototipus 2.....	54
10.4. Test de gir 3.....	56
10.4.1. Prova 4.1.	56
10.4.1.1. Resultats Prova 4.1.	57
10.4.2. Prova 4.2.	57
10.4.2.1. Resultats Prova 4.2.	58
10.4.3. Prova 4.3.	59
10.4.3.1. Resultats Prova 4.3.	59

10.4.4.	Prova 4.4.	60
10.4.4.1.	Resultats Prova 4.4.	60
10.4.5.	Prova 4.5.	62
10.4.5.1.	Resultats Prova 4.5.	62
10.4.6.	Prova 4.6.	63
10.4.6.1.	Resultats Prova 4.6.	63
10.4.7.	Prova 4.7.	64
10.4.7.1.	Resultats Prova 4.7.	64
10.4.8.	Prova 4.8.	65
10.4.8.1.	Resultats Prova 4.8.	65
10.4.9.	Prova 4.9.	66
10.4.9.1.	Resultats Prova 4.9.	66
10.5.	Resultats obtinguts en els tests de gir.	68
10.5.1.	Simulacions de moviment efectuades amb ORCAFLEX.	68
11.	Experimentació: Tests amb piezoelèctric.	72
11.1.	Tipus de piezoelèctric emprat.....	72
11.1.1.	Muntatge del piezoelèctric al prototipus.	74
11.2.	Test amb piezoelèctric 1.	75
11.2.1.	Prova 2.1.	76
11.2.2.	Prova 2.2.	79
11.2.3.	Prova 2.3.	81
11.2.4.	Prova 2.4.	82
11.2.5.	Prova 2.5.	83
11.2.6.	Prova 2.6.	85
11.2.7.	Prova 2.7.	86
11.2.8.	Prova 2.8.	88
11.2.9.	Prova 2.9.	90
11.2.10.	Prova 2.10.....	91
11.2.11.	Prova 2.11.....	92
11.2.12.	Prova 2.12.....	93
11.2.13.	Prova 2.13.....	94
11.2.14.	Prova 2.14.....	96
11.3.	Resultats test amb piezoelèctric 1.	98
11.4.	Test amb piezoelèctric 2.	101
11.4.1.	Prova 4.1.	101
11.4.2.	Prova 4.2.	102
11.4.3.	Prova 4.3.	103
11.4.4.	Prova 4.4.	104
11.4.5.	Prova 4.5.	105

11.4.6.	Prova 4.6.	106
11.5.	Resultats test amb piezoelèctric 2.	108
11.6.	Test amb piezoelèctric 3.	111
11.6.1	Prova 6.1.	111
11.6.2.	Prova 6.2.	112
11.6.3.	Prova 6.3.	113
11.6.4.	Prova 6.4.	114
11.6.5.	Prova 6.5.	115
11.7.	Resultats test amb piezoelèctric 3.	117
11.8.	Resultats obtinguts en els tests amb piezoelèctric.	117
11.8.1.	Comparació resultats amb deformació del piezoelèctric per xoc.	118
12.	Conclusions.	121
13.	Bibliografia.	122

ANNEXES:

ANNEX I: RESULTATS TESTS EFECTUATS AMB PIEZOELÈCTRICS

ANNEX II: CATÀLEGS PECES NORMALITZADES UTILITZADES EN EL DISPOSITIU.

ANNEX II: PLÀNOLS.

Índex de figures

FIGURA 3.1. OBSERVATORI MARÍ OBSEA.	11
FIGURA 3.2. WAVEROLLER.	12
FIGURA 3.3. ARCHIMEDES WAVES SWINGS.	12
FIGURA 3.4. BIOWAVE.	13
FIGURA 3.5. PROTOTIPUS DE COL·LECTOR DEL PROJECTE DE FI DE GRAU EFECTUAT AMB ANTERIORITAT.	15
FIGURA 4.1. CLASSIFICACIÓ DE LES TÈCNiques DE CAPTACIÓ D'ENERGIA APLICADES A WSNS. [FONT SHAIKH & ZEADALLY, 2016]	18
FIGURA 5.1. IMANT ACTUANT SOBRE LLIMADURES DE FERRO. [FONT: NEWTON HENRY BLACK - NEWTON HENRY BLACK, HARVEY N. DAVIS (1913) PRACTICAL PHYSICS, THE MACMILLAN CO., USA, P. 242, FIG. 200]	21
FIGURA 5.2. ESQUEMA DE LES CORRENTS D'AMPÈRE.	24
FIGURA 5.3. ESQUEMA LÍNIES MAGNÈTIQUES ENTRE DOS IMANTS DE BARRA.	26
FIGURA 6.1. ESQUEMA D'EFFECTE DIRECTE I EFFECTE INVERS EN PIEZOELÈCTRICS.	27
FIGURA 7.1. CROQUIS DEL PÈNDOL FÍSIC.	30
FIGURA 7.2. MOVIMENT DEL PÈNDUL PARTINT D'UNA CERTA ALÇADA.	32
FIGURA 8.1. CROQUIS 1 PART MÒBIL PROTOTIPUS.	35
FIGURA 8.2. CROQUIS 2 PART MÒBIL PROTOTIPUS.	36
FIGURA 8.3. MUNTATGE DE LA PART MÒBIL.	36
FIGURA 8.4. PEÇA DE POLIPROPILÈ.	40
FIGURA 8.5. MUNTATGE PART FIXA 1.	41
FIGURA 8.6. MUNTATGE PART FIXA 2.	42
FIGURA 8.7. MUNTATGE PART FIXA 3.	42
FIGURA 8.8. SUPORT PER LA TAULA DE PROVES.	43
FIGURA 8.9. MUNTATGE DEFINITIU DEL PROTOTIPUS.	44
FIGURA 9.1. IMANTS ECLIPSE EN FORMA DE DISC.	45
FIGURA 9.2. TIPUS DE MAGNETITZACIÓ DE L'IMANT ESCOLLIT.	45
FIGURA 10.1. DISPOSITIU ACOBLAT A LA TAULA DE PROVES.	48
FIGURA 10.2. DISC AMB LÍNIES PER FER EL RECOMPTE DE VOLTES.	49
FIGURA 10.3. SITUACIÓ DE LA CÀRREGA PUNTUAL AL DISC.	49
FIGURA 10.4. PART SUPERIOR I PART INFERIOR DEL PROTOTIPUS.	54
FIGURA 10.5. CONFIGURACIÓ PART SUPERIOR.	54
FIGURA 10.6. CONFIGURACIÓ PART INFERIOR.	55
FIGURA 10.7. CÀRREGA TEST DE GIR 2.	56
FIGURA 10.8. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 4.2. (ESQUERRA DISC SUPERIOR/DRETA DISC INFERIOR)	58
FIGURA 10.9. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 4.3. (ESQUERRA DISC SUPERIOR/DRETA DISC INFERIOR)	59
FIGURA 10.10. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 4.4. (ESQUERRA DISC SUPERIOR/DRETA DISC INFERIOR)	60
FIGURA 10.11. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 4.5. (ESQUERRA DISC SUPERIOR/DRETA DISC INFERIOR)	62
FIGURA 10.12. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 4.6. (ESQUERRA DISC SUPERIOR/DRETA DISC INFERIOR)	63
FIGURA 10.13. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 4.7. (ESQUERRA DISC SUPERIOR/DRETA DISC INFERIOR)	64
FIGURA 10.14. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 4.8. (ESQUERRA DISC SUPERIOR/DRETA DISC INFERIOR)	65
FIGURA 10.15. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 4.9. (ESQUERRA DISC SUPERIOR/DRETA DISC INFERIOR)	66
FIGURA 10.16. ANGLE D'INCLINACIÓ DEL PROTOTIPUS.	68
FIGURA 10.17. DIMENSIONS DE LA BOIA QUE SERÀ SIMULADA (MESURES EN MM).	69
FIGURA 10.18. SIMULACIÓ EFECTUADA DE LA BOIA AMB ELS PUNTS SELECCIONATS.	70
FIGURA 10.19. ANGLE INCLINACIÓ BOIA SIMULADA.	71
FIGURA 11.1. CROQUIS AMB LES VISTES DEL PIEZOELÈCTRIC UTILITZAT.	73

FIGURA 11.2. DIMENSIONS DEL PIEZOELÈCTRIC EMPLAAT.	73
FIGURA 11.3. MUNTATGE DE L'IMANT AL PIEZOELÈCTRIC.	74
FIGURA 11.4. MUNTATGE FINAL AMB EL PIEZOELÈCTRIC.	74
FIGURA 11.5. CONNEXIONS DEL PIEZOELÈCTRIC.	75
FIGURA 11.6. DISPOSICIÓ DEL IMANTS EN LES PROVES AMB PIEZOELÈCTRICS.	76
FIGURA 11.7. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 2.1.	77
FIGURA 11.8. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 2.2.	79
FIGURA 11.9. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 2.3.	81
FIGURA 11.10. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 2.4.	82
FIGURA 11.11. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 2.5.	84
FIGURA 11.12. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 2.6.	85
FIGURA 11.13. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 2.7.	87
FIGURA 11.14. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 2.8.	88
FIGURA 11.15. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 2.9.	90
FIGURA 11.16. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 2.10.	91
FIGURA 11.17. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 2.11.	92
FIGURA 11.18. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 2.12.	93
FIGURA 11.19. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 2.13.	94
FIGURA 11.20. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 2.14.	96
FIGURA 11.21. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 4.1.	101
FIGURA 11.22. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 4.3.	103
FIGURA 11.23. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 4.4.	104
FIGURA 11.24. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 4.5.	105
FIGURA 11.25. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 4.6.	106
FIGURA 11.26. NOVA DISPOSICIÓ DELS IMANTS AL PROTOTIPUS.	111
FIGURA 11.27. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 6.1.	112
FIGURA 11.28. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 6.2.	113
FIGURA 11.29. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 6.3.	114
FIGURA 11.30. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 6.4.	115
FIGURA 11.31. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 6.5.	116
FIGURA 11.32. CONFIGURACIÓ MAGNÈTICA PROVA 2.7 I PROVA 4.5.	117

Índex de taules

TAULA 4.1. DENSITAT DE POTÈNCIA I EFICIÈNCIA DE LES TÈCNIQUES D'ENERGY HARVESTING APLICADES A SENSORS. [FONT: BASAGNI, 2015].	20
TAULA 6.1. TIPUS DE MATERIALS PIEZOELÈCTRICS I APLICACIONS.	29
TAULA 8.1. ESPECIFICACIONS RODAMENT EMPLAAT.	34
TAULA 8.2. ESPECIFICACIONS CARGOL UTILITZAT.	37
TAULA 8.3. ESPECIFICACIONS ROSQUES UTILITZADES.	38
TAULA 8.4. ESPECIFICACIONS VOLANDERES HELICOÏDALS DE PRESSIÓ.	39
TAULA 8.5. ESPECIFICACIONS VOLANDERES PLANES.	39
TAULA 9.1. PROPIETATS MAGNÈTIQUES DEL IMANTS N35.	46
TAULA 9.2. PROPIETATS IMANTS DE NEODIMI.	46
TAULA 9.3. RESULTATS DE LA FORÇA ENTRE IMANTS PER A DIFERENTS DISTÀNCIES.	47
TAULA 10.1. NÚMERO VOLTES COMPLETES PROVA 10.2.1.	50
TAULA 10.2. RESULTATS VELOCITATS 10.2.1.	51
TAULA 10.3. RESULTATS VELOCITATS (2) 10.2.1.	52
TAULA 10.4. PARÁMETRES TAULA DE PROVES 10.3.1.	55
TAULA 10.5. RESULTAT VELOCITAT PROVA 4.1.	57
TAULA 10.6. RESULTATS VELOCITATS PROVA 4.2.	58
TAULA 10.7. RESULTATS VELOCITATS PROVA 4.4.	61
TAULA 10.8. RESULTATS VELOCITATS (2) PROVA 4.4.	61
TAULA 10.9. RESULTATS VELOCITAT PROVA 4.9.	67
TAULA 10.10. RESULTATS VELOCITATS (2) PROVA 4.9.	67
TAULA 11.1. RESULTATS PROVA 2.1.	79
TAULA 11.2. RESULTATS PROVA 2.2.	80

TAULA 11.3. RESULTATS PROVA 2.3.	82
TAULA 11.4. RESULTATS PROVA 2.5.	85
TAULA 11.5. RESULTATS PROVA 2.7.	88
TAULA 11.6. RESULTATS PROVA 2.8.	89
TAULA 11.7. RESULTATS PROVA 2.13.	95
TAULA 10.20. RESULTATS PROVA 2.14.	97
TAULA 11.9. COMPARATIVA RESULTATS PROVA 2.7 I PROVA 4.5.	118

Índex de Gràfiques

GRÀFICA 10.1. ALÇADA PUNT 1 DURANT LA SIMULACIÓ (ORDENADES: ALÇADA [M]; ABSCISSES: TEMPS [S]).	70
GRÀFICA 10.2. ALÇADA PUNT 2 DURANT LA SIMULACIÓ. (ORDENADES: ALÇADA [M]; ABSCISSES: TEMPS [S]).	71
GRÀFICA 11.1. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI PROVA 2.1.	77
GRÀFICA 11.2. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 2.2.	80
GRÀFICA 11.3. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 2.3.	81
GRÀFICA 11.4. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 2.4.	83
GRÀFICA 11.5. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 2.5.	84
GRÀFICA 11.6. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 2.6.	86
GRÀFICA 11.7. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 2.7.	87
GRÀFICA 11.8. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 2.8.	89
GRÀFICA 11.9. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 2.9.	90
GRÀFICA 11.10. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 2.10.	91
GRÀFICA 11.11. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 2.11.	92
GRÀFICA 11.12. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 2.12.	94
GRÀFICA 11.13. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 2.13.	95
GRÀFICA 11.14. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 2.14.	96
GRÀFICA 11.15. COMPARATIVA DE POTÈNCIES OBTINGUDES EN EL TEST AMB PIEZOELÈCTRIC 1.	98
GRÀFICA 11.16. COMPARATIVA D'ENERGIES OBTINGUDES EN EL TEST AMB PIEZOELÈCTRIC 1.	99
GRÀFICA 11.17. COMPARATIVA D'ENERGIES PER MINUT OBTINGUDES EN EL TEST AMB PIEZOELÈCTRIC 1.	100
GRÀFICA 11.18. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 4.1.	102
GRÀFICA 11.19. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 4.2.	103
GRÀFICA 11.20. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 4.3.	104
GRÀFICA 11.21. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 4.4.	105
GRÀFICA 11.22. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 4.5.	106
GRÀFICA 11.23. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 4.6.	107
GRÀFICA 11.24. COMPARATIVA DE POTÈNCIES OBTINGUDES EN EL TEST AMB PIEZOELÈCTRIC 2.	108
GRÀFICA 11.25. COMPARATIVA D'ENERGIES OBTINGUDES EN EL TEST AMB PIEZOELÈCTRIC 2.	109
GRÀFICA 11.26. COMPARATIVA D'ENERGIES PER MINUT OBTINGUDES EN EL TEST AMB PIEZOELÈCTRIC 2.	109
GRÀFICA 11.27. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 6.1.	112
GRÀFICA 11.28. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 6.2.	113
GRÀFICA 11.29. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 6.3.	114
GRÀFICA 11.30. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 6.4.	115
GRÀFICA 11.31. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 6.5.	116
GRÀFICA 11.32. GRÀFICA DESCRITA PER L'OSCIL·LOSCOPI EN LA PROVA 4.5.	119
GRÀFICA 11.33. GRÀFICA OBTINGUDA EN EL PROJECTE "DISSENY, CONSTRUCCIÓ I EXPERIMENTACIÓ D'UN PROTOTIPUS DE COL·LECTOR D'ENERGIA A PARTIR DE L'ONATGE MARÍ MITJANÇANT PIEZOELÈCTRICS DE VIBRACIÓ".	119

1. Introducció

Un dels principals problemes del segle XXI és l'obtenció d'energia per produir electricitat en un món on cada cop més, la indústria i el dia a dia de la gent va lligat a l'ús d'aparells tecnològics.

Les fonts convencionals de producció d'energia tradicionals cada cop es troben més obsoletes i tant les inversions econòmiques, com les investigacions tendeixen a un futur d'energia més neta. Els problemes d'aquestes energies tradicionals cada cop són més evidents, la seva obtenció no és il·limitada i es preveu una terminació de les reserves a llarg termini; l'altre principal inconvenient, és l'emissió de gasos contaminants nocius per el nostre planeta i per la nostra salut.

És per aquests motius que les energies provinents del carbó, el petroli, el gas natural, o per fissió nuclear, estan en una tendència de canvi a energies renovables com poden ser l'energia eòlica, la geotèrmica, la hidroelèctrica, mareomotriu o solar.

S'estan produint esforços, tant per part dels governs, efectuant canvis de legislacions on es beneficia l'ús d'energies renovables i on es penalitza la utilització d'energies tradicionals; com per part de la societat, on cada vegada les persones estan més mentalitzades a efectuar un canvi que serà beneficiós a la llarga per tothom.

Malgrat aquests esforços es preveu un procés molt llarg on estaran involucrats molts col·lectius de la societat i, en especial des de l'àmbit de l'enginyeria.

És en aquest marc on s'engloba aquest Treball de Fi de Grau, més específicament en el marc del projecte *"Interoperabilidad e instrumentación de Plataformas marinas autónomas Para La monitorización sísmica", proyecto INTMARSIS del Ministerio de Economía y Competitividad* (<https://sites.google.com/site/intmarsis/>). El projecte integra diferents tecnologies de mesura i comunicació de dades en un nou disseny de boia en superfície i sismòmetre en el fons marí.

El present treball fi de grau, es troba englobat en el quart objectiu específic del projecte INTMARSIS, que fa referència a la "Captació d'energia del medi ambient (Energy Harvesting)", i que té com missió fer un estudi comparatiu, avaluació i recerca de diferents tècniques per generar energia elèctrica, principalment aprofitant els corrents i onatge marins, o una combinació d'ambdós, que junt amb panells solars i generador eòlic permetin aportar de forma permanent energia a l'electrònica de la instal·lació.

2. Objectius

L'objectiu principal d'aquest treball de fi de grau és l'estudi de la millora, utilitzant la força dels imants, del prototipus de col·lector d'energia desenvolupat l'any 2014/2015 pel *Centre de Desenvolupament Tecnològic de Sistemes d'Adquisició Remota i Tractament de la Informació (SARTI)* i documentat al Projecte Final de Carrera: *Disseny, construcció i experimentació d'un prototipus de col·lector d'energia a partir de l'onatge marí mitjançant piezoelèctrics de vibració.*

El col·lector d'energia consta d'un dispositiu amb un pèndol que en girar produeix energia elèctrica gràcies a uns piezoelèctrics. El moviment del pèndol depèn dels moviments marins ja que aquest dispositiu es preveu ubicar sota, o a la superfície, del mar.

En el present treball s'estudiarà, per un banda, la possibilitat de millora del gir del pèndol mitjançant la disposició d'un camp magnètic amb l'objectiu d'augmentar el nombre d'impactes sobre els piezoelèctrics. Per altra banda, es pretén també estudiar la possibilitat de realitzar la deformació del material piezoelèctric mitjançant els camps magnètics i estudiar la seva viabilitat per a la producció d'energia elèctrica en el mateix prototipus.

Per aconseguir l'objectiu de la millora del col·lector d'energia el treball a desenvolupar es dividirà en cinc diferents fases:

1. Recopilació d'informació i estudi dels antecedents dels diferents tipus de col·lectors d'energia desenvolupats.
2. Disseny de les possibles configuracions magnètiques al rotor del captador per tractar de millorar el seu gir.
3. Experimentació de les configuracions.
4. Estudi de l'excitació del piezoelèctric per força magnètica.
5. Estudi de resultats en vistes a la millora de captació d'energia del dispositiu.

3. Antecedents.

Estudis anteriors a aquest TFG han tingut com principal objectiu l'estudi i el disseny d'un prototipus de captador que alimentés sensors marins, en concret als sensors situats a l'OBSEA.

L'OBSEA és un observatori marí situat a 4 Km de la costa de Vilanova i la Geltrú (Figura 3.1), el qual conté diversos sensors i càmeres que serveixen per estudiar el medi marí. L'OBSEA va ser realitzat i és gestionat pel grup SARTI. Aquest observatori en l'actualitat està alimentat mitjançant un cable que va a una presa de corrent a terra.



Figura 3.1. Observatori marí OBSEA.

Aquest grup de recerca ja porta uns anys en funcionament i s'han dut a terme diversos projectes relacionats amb l'obtenció d'energia del medi marí.

Aquest Treball de fi de Grau prendrà com a punt de partida els anteriors projectes efectuats.

En els següents apartats es farà un resum dels projectes i les patents efectuades (tant des del grup SARTI com d'altres grups i empreses) i les seves característiques i com es podran extreure les idees per executar-les en el present treball.

3.1. WaveRoller

Un dels productes patentats i dissenyats de la companyia *AW-Energy Ltd.* és el *WaveRoller* (Figura 3.2).

Aquest dispositiu converteix l'energia de les onades en energia i electricitat.

El funcionament del dispositiu és el següent: el vaivé de les onades produït per les onades proporciona a un panell moviment. Aquests moviments són convertits en electricitat mitjançant un generador accionat a un motor hidràulic.

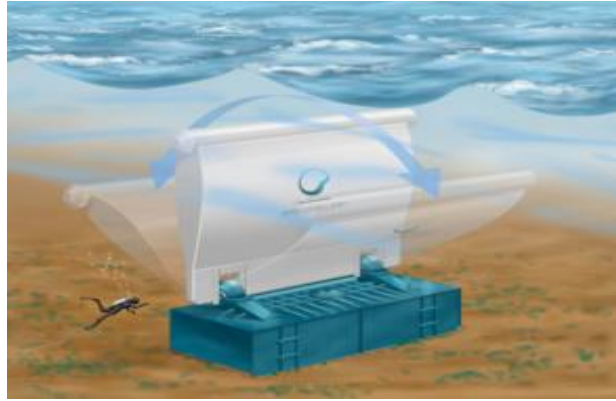


Figura 3.2. WaveRoller.

Les potències que pot produir oscil·len de 500 a 1000 kW. Depenent del medi al qual es trobi allotjat.

Aquesta patent no seria un model a prendre per efectuar el present projecte ni per dimensions del dispositiu ni per la potència que s'obté. Però sí que pot servir com a exemple de generació d'energia i electricitat gràcies al moviment al fons marí.

3.2. Archimedes Waves Swings (AWS).

El AWS (Figura 3.3), de la mateixa companyia que el *WaveRoller*, el seu disseny també es basa en la producció d'electricitat gràcies a la força dels oceans.

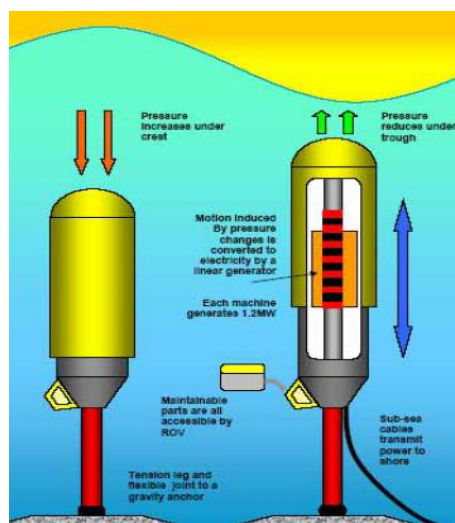


Figura 3.3. Archimedes Waves Swings.

Aquest dispositiu és ancorat al fons marí i està format per dos cilindres. Un que es manté fixa i l'altre que es mou verticalment sobre l'altre. El cilindre fixa té incorporada una bobina, mentre que el cilindre mòbil conté imants. Amb aquesta configuració, en desplaçar-se el cilindre superior, amb l'energia de les ones, es crea energia elèctrica. Amb aquest dispositiu s'han aconseguit potències de fins a 250 kW.

Aquest projecte seria un enginy més semblant a lo que es vol realitzar en aquest futur projecte, encara que la potència produïda continuï sent molt elevada.

3.3. bioWAVE.

El dispositiu *bioWAVE* de l'empresa *BioPower Systems*, és un dispositiu que està dissenyat per funcionar amb les onades de l'oceà, tant per l'absorció de les onades de la superfície com les del fons marí (Figura 3.4).

El prototip construït pot treballar fins a un profunditats de 30 metres.

El funcionament és el següent: el dispositiu està muntat al fons del mar amb un pivot a la part inferior.

Les "pales" flotants interactuen amb la superfície d'ascens i descens del mar (energia potencial) i el vaivé de l'aigua (energia cinètica).

Com a resultat d'aquestes energies, l'estructura pivotant es balanceja cap enrere i cap endavant amb sintonia amb les onades.

L'energia continguda en aquest moviment és convertida en electricitat mitjançant un mòdul de conversió d'energia.

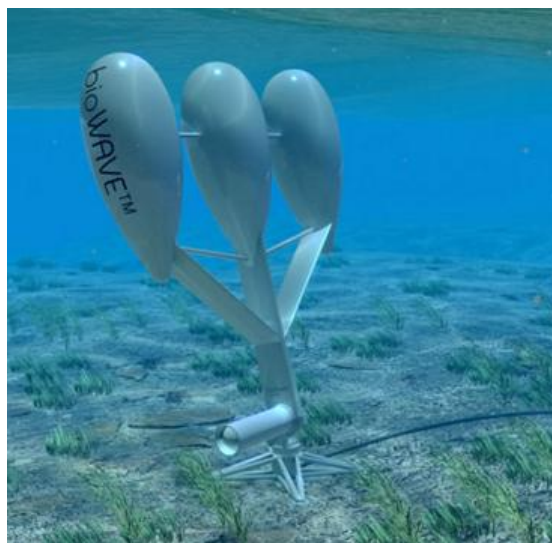


Figura 3.4. bioWAVE.

Aquest dispositiu no seria de la mateixa magnitud que el captador d'energia que es vol desenvolupar en aquest projecte. Però és un antecedent a tenir en compte degut al seu disseny i al impacte que va tenir en el sector.

3.4. Col·lector d'energia mitjançant piezoelèctrics de vibració.

Els tres exemples anteriors, com és pot comprovar, són dispositius pensats per a captar grans potències a partir de l'onatge marí (de aproximadament 250 a 1000 kW).

En el cas del Treball Fi de Grau, el dispositiu a estudiar estaria dins de l'àrea de la "microgeneració de potència" que ha estat desenvolupada significativament durant les dues darreres dècades en el camp de sistemes microelectromecànics i d'autoalimentació de sensors sense fils. En aquests casos les bateries són la principal font d'energia d'aquests sistemes, però degut a les seves limitacions (temps de vida finita, reemplaçament periòdic i contaminació mediambiental) la recerca ha estat orientada en substituir les bateries per captadors d'energia del medi ambient.

La potència consumida per un sensor sense fils depèn de la seva aplicació específica i de varis factors com la quantitat d'energia que necessita per a registrar la dada, la seva comunicació i quan es troba en "standby". Segons Basagni et al. (2013), la potència consumida promig per un sensor és de 0,8 mW. Considerant a més les pèrdues per conversió en el circuit de captació, és pot dir, que el captador ha de produir una potència mínima de 1 mW per ser vàlid.

Un dels projectes portats a terme pel grup SARTI, va ésser elaborat per *Jordi Vidal Rubio; Disseny, construcció i experimentació d'un prototipus de col·lector d'energia a partir de l'onatge marí mitjançant piezoelèctrics de vibració a L'Escola Politècnica Superior D'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú.*

Es va dissenyar i construir un prototipus format per un pèndol giratori contingut dins d'un cilindre i ancorat al fons marí (seguint el muntatge d'una boia) per tal de que amb els moviments marins el pèndol intern oscil·li.

Per tal de generar l'energia elèctrica es van disposar al mecanisme d'uns piezoelèctrics situats al cilindre de tal manera que en girar el pèndol aquests piezoelèctrics s'exciten en ser percutits per unes pues situades al pèndol.

El prototipus va se dissenyat de manera estanca així podia ser provat en el mar, o un aquari de proves.

En el projecte també es fa una simulació el programa ORCAFLEX per tal de poder estudiar els moviments del medi marí en quant a freqüències i amplituds de l'onatge.

Un cop obtinguts els primers dissenys, es va variant la distribució de pesos del pèndol per tal d'obtenir un moviment el més òptim possible.

També es canvia la disposició del pèndol, en comptes d'anar en sentit vertical s'opta per col·locar-lo en sentit horitzontal (Figura 3.5), ja que en les diferents proves queda demostrar que amb aquesta disposició en el medi marí s'aprofita més el moviment.

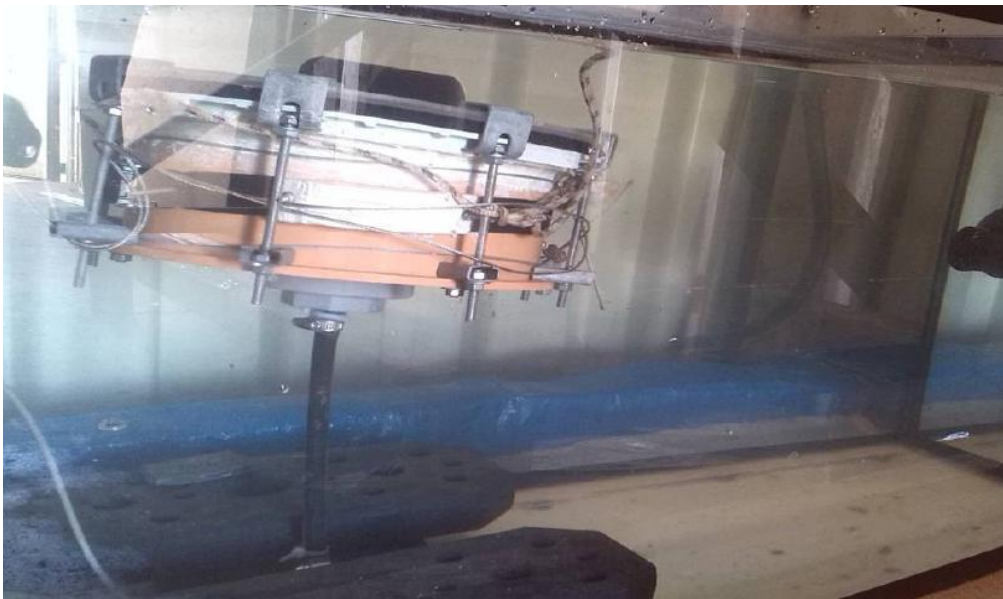


Figura 3.5. Prototipus de col·lector del Projecte de fi de Grau efectuat amb anterioritat.

Aquest va ser el darrer projecte elaborat en la recerca de l'aprofitament de l'energia en el medi marí per l'observatori OBSEA, per tant, s'agafarà com a punt de partida les conclusions a les quals s'arriben en aquesta recerca per tal de seguir l'estudi.

Altres projecte que també s'han desenvolupat en el mateix àmbit i des del Departament de Mecànica de Fluids de la EPSEVEG i amb col·laboració amb el Centre de Desenvolupament Tecnològic de Sistemes d'Adquisició Remota i Tractament de la informació (SARTI) i que s'han tingut en compte en el desenvolupament del present projecte, són els següents:

- *Estudi experimental d'un captador d'energia marina per aplicacions de baixa potència mitjançant piezoelèctrics d'impacte de David Pujol Brescó (UPC 2013).*

- *Disseny i caracterització d'un col·lector d'energia giratori amb piezoelèctrics d'excitació per vibració a l'observatori OBSEA de Ferran Bernet Piquet (UPC 2014).*

4. Energy Harvesting.

El terme *energy harvesting*, o captadors d'energia, es refereix a dispositius que són capaços de generar electricitat a partir de l'energia de les fonts externes. Aquesta energia es pot recol·lectar i utilitzar per alimentar sistemes de baix consum.

El mercat relacionat amb l'*energy harvesting* és gran i està en creixement constant. Segons un anàlisi efectuat per *IDTechEx*, els col·lectors d'energia era un mercat de \$0,7 bilions al 2012 i els estudis demostren que pot créixer fins els \$5 bilions al 2022. Per llavors més de 250 milions de dispositius seran alimentats per fonts d'*energy harvesting*.

En el cas del Treball de Fi de Grau, l'aplicació que es pretén estudiar fa referència a l'alimentació de sensors sense fils de baixa potència. Actualment són nombrosos els treballs de recerca enfocats a la captació d'energia per a l'alimentació de xarxes de sensors sense cables (*Wireless Sensor Networks (WSNs)*), degut a que el seu major problema és la limitada capacitat de les bateries que els alimenten. A més, algunes d'aquestes xarxes de sensors poden trobar-se en llocs difícils d'accedir per al canvi de bateries i, a més, en condicions extremes les bateries es poden fer malbé, donant lloc a substàncies químiques que poden causar problemes mediambientals.

Segons Shaikh & Zeadally (2016), la classificació de tècniques d'*energy harvesting* aplicades a WSNs són:

- A partir de fonts ambientals:
 - Tècniques basades en radio freqüència.
 - Tècniques basades en energia solar.
 - Tècniques basades en energia tèrmica.
 - Tècniques basades en energia relacionada amb el flux d'un fluid.
- A partir d'energies externes:
 - Tècniques basades en energia mecànica.
 - Tècniques basades en energia humana.

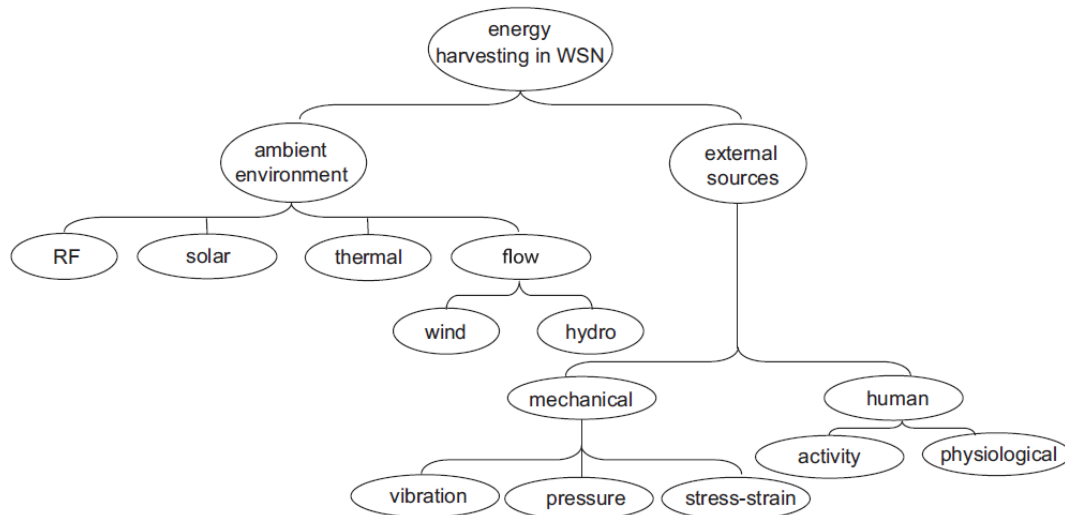


Figura 4.1. Classificació de les tècniques de captació d'energia aplicades a WSNs. [Font Shaikh & Zeadally, 2016]

Així, els captadors d'energia més utilitzats es basen en les següents fonts d'energia:

- **Fotovoltaica:** Converteix l'energia solar en energia elèctrica. Les cèl·lules fotovoltaïques tenen la major densitat de potència i la potència de sortida més alta del diversos sistemes de captació d'energia.

Un exemple d'aplicació de l'energia fotovoltaica a l'àmbit dels col·lectors d'energia serien les petites cel·les fotovoltaïques incorporades a les calculadores, joguines, controls d'il·luminació de carrers o fonts d'alimentació portàtils.

Atès que les fonts de llum tendeixen a ser intermitents, les cèl·lules solars s'utilitzen per carregar bateries o supercondensadors per proporcionar una font d'energia estable.

- **Termoelèctrica:** Aplicada a els *energy harvesters* que es basen en la conversió de la calor en energia elèctrica.

Els captadors basats en la energia termoelèctrica estan basats en l'efecte *Seebeck*. Aquest efecte consisteix en que es crea un voltatge quan hi ha un diferencial de temperatura en la unió de dos metalls diferents.

Els generadors termoelèctrics consisteixen en una sèrie de termoparells connectats en sèrie a una font de calor comú tal com un motor, escalfador d'aigua, o a la part posterior d'un panell solar.

Els generador termoelèctrics s'utilitzen normalment per alimentar nodes de sensors sense fils en entorns d'altres temperatures, com són un exemple els sistemes de calefacció industrials.

- **Radiofreqüència:** Aquest tipus de captadors d'energia capturen les radiacions de radiofreqüència de l'ambient, la rectifiquen, l'augmenten i la fan servir per alimentar dispositius de baixa potència.

Les aplicacions per aquests tipus de dispositius inclouen sensors sense bateries i sense fils de monitorització industrial, automatització d'edificis, xarxes intel·ligents, agricultura i defensa.

- **Piezoelèctrica:** Els materials piezoelèctrics, en ser sotmesos a una pressió o a una deformació, la seva massa adquireix una polarització elèctrica i apareix una diferència de potencial i càrregues elèctriques en la seva superfície.

Els materials piezoelèctrics seran exposats amb més deteniment en apartats posteriors.

Molts treballs de recerca s'han basat en aplicacions de materials piezoelèctrics a la conversió d'energia a partir de vibracions ambientals [Abdelkefi (2016)].

- **Electromagnetisme:** els transductors electromagnètics són utilitzats per a convertir energia cinètica (per exemple, vibració mecànica) en energia elèctrica. En força casos, s'utilitzen simultàniament com mecanismes transductors tots dos sistemes: electromagnètic i piezoelèctric.

En els dos apartats següents, apartats 5 i 6, s'estudien amb més detall en primer lloc l'electromagnetisme, i en segon lloc, la piezoelectricitat.

La densitat de potència dels diferents captadors d'energia depèn de la seva aplicació específica, que afecta al propi disseny i grandària del generador. Però en general, la majoria dels dispositius de captació d'energia per a electrònica portàtil generen molt poca energia.

Un sumari de les tecnologies d'energy harvesting aplicades a sensors sense fils és la mostrada a la Taula 4.1.

Taula 4.1. Densitat de potència i eficiència de les tècniques d'energy harvesting aplicades a sensors.
[Font: Basagni, 2015].

Energy harvesting technique	Power density	Efficiency
Photovoltaic	Outdoors (direct sun): 15 mW/cm^2 Outdoors (cloudy day): 0.15 mW/cm^2 Indoors: $<10 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$ [9, 21, 105, 126]	Highest: $32 \pm 1.5\%$ Typical: $25 \pm 1.5\%$ [48]
Thermoelectric	Human: $30 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$ Industrial: 1 to 10 mW/cm^2 [53, 126]	$\pm 0.1\%$ $\pm 3\%$ [126]
Pyroelectric	$8.64 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$ at the temperature rate of 8.5° C/s [77]	3.5% [125]
Piezoelectric	$250 \text{ }\mu\text{W/cm}^3$ $330 \text{ }\mu\text{W/cm}^3$ (shoe inserts) [21, 105]	^a
Electromagnetic	Human motion: 1 to $4 \text{ }\mu\text{W/cm}^3$ [88, 121] Industrial: $306 \text{ }\mu\text{W/cm}^3$ [8], $800 \text{ }\mu\text{W/cm}^3$ [121]	^a
Electrostatic	50 to $100 \text{ }\mu\text{W/cm}^3$ [124]	^a
RF	GSM 900/1800 MHz: $0.1 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$ WiFi 2.4 GHz: $0.01 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$ [9]	50% ^b [94]
Wind	$380 \text{ }\mu\text{W/cm}^3$ at the speed of 5 m/s [103, 104]	5% [103]
Acoustic noise	$0.96 \text{ }\mu\text{W/cm}^3$ at 100 dB $0.003 \text{ }\mu\text{W/cm}^3$ at 75 dB [14, 95]	^c

^a Maximum power and efficiency are source dependent.

^b Excluding transmission efficiency.

^c Noise power densities are theoretical values.

5. Fonaments dels imants.

Un imant és un material que produeix un camp magnètic. Aquests camp magnètic pot atreure a altres imants o metalls ferromagnètics (Fe, Co, Ni, o aliatges d'aquests).

Es creu que el descobriment d'aquests materials que eren capaços de crear un camp magnètic va ser a l'antiga Grècia, i va se descoberta a l'illa de Magnesia de Tesalia una pedra amb propietats magnètiques que va ser anomenada Magnetita (Fe_3O_4).

Els primers usos pràctics obtinguts amb la Magnetita van ser entre els segles 12 i 13 dC, es van construir brúixoles magnètiques per a la navegació a Xina i Europa entre altres llocs.

5.1. Funcionament del imants

A l'interior de la matèria magnètica existeixen petites corrents tancades al moviment dels electrons que contenen els àtoms. Cadascuna d'elles genera un imant microscòpic, quan aquests petits imants estan orientats en totes les seves direccions els seus efectes s'anul·len, per contra si tots els imants microscòpics s'alineen formen un únic imant i es diu que la substància s'ha magnetitzat.

Els imants consten de dos pols; pol nord i pol sud. Els pols oposats s'atreuen i els iguals es repel·leixen.

Si l'imant es trenca en dos parts, es formen dos nous imants amb els respectius pols, encara que de menor força que l'imant inicial.

Per determinar els pols d'un imant es considera la tendència d'aquest a orientar-se als pols magnètics de la Terra, el pol nord de l'imant s'orienta al pol nord de la Terra.

En la Figura 5.1 es pot observar els efectes del dos pols en actuar sobre llimadures de ferro.

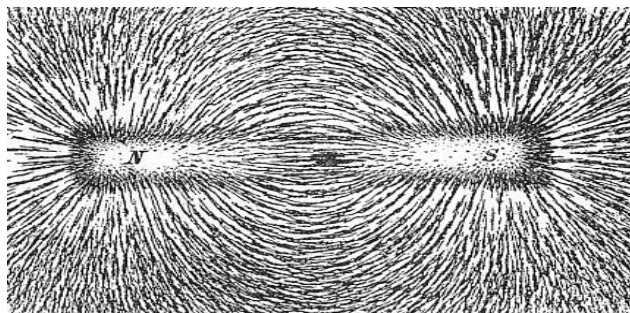


Figura 5.1. Imant actuant sobre llimadures de ferro. [Font: Newton Henry Black - Newton Henry Black, Harvey N. Davis (1913) Practical Physics, The MacMillan Co., USA, p. 242, fig. 200]

Tipus d'imants segons la seva obtenció:

1. **Imants naturals:** són referits a minerals naturals que tenen la propietat d'atreure a altres elements. Un exemple és la magnetita.
2. **Imants artificials:** aquesta definició s'aplica als cossos que després de ser friccionats amb magnetita es transformen en imants. Amb l'acer i el ferro es poden fabricar imants artificials.

Tipus d'imants segons la duració de les propietats magnètiques:

1. **Imants temporals:** Materials que es comporten amb propietats magnètiques i formats per ferro dolç. Posseeixen una atracció magnètica de curta duració.

- **Electroimants:** Per fabricar un electroimant és necessari enrotllar filferro al voltant d'un material, aquesta formació és coneguda com solenoide. Per magnetitzar el material es fa passar un corrent pel solenoide per crear el camp magnètic. El camp creat és més fort al centre de la bobina, i la força del camp és proporcional al nombre de bucles del solenoide i la força del corrent.

2. **Imants permanents:** Els pertanyents a aquesta categoria són imants que retenen el seu magnetisme un cop han estat magnetitzats. Els imants permanents es poden dividir en quatre categories principals:

- **Imants de Neodimi (NdFeB):** Tipus d'imant pertanyent a la categoria de terres rares. Imant permanent fabricat amb un aliatge de neodimi (Nd), ferro (Fe) i bor (B).

Els imants de Neodimi tenen baixa resistència mecànica, tendeixen a ser fràgils i tenen baixa resistència a la corrosió si es deixen sense cobrir, però, són els imants amb més poder que existeixen al mercat. Aquesta potència els ha fet ser els imants més utilitzats en l'actualitat. Aquests imants s'utilitzen en aplicacions com la fabricació de motors en eines sense fil, discs durs o segells magnètics.

- **Imants de Samari-Cobalt (SmCo):** Igual que els imants de NdFeB pertanyen a la categoria de terres rares, són molt forts i difícils de desmagnetitzar.

El seu poder estaria per darrere dels imants de Neodimi, però són altament resistents a l'oxidació i resistents a altes temperatures (poden aguantar fins 300 °C).

Per contra, tenen una baixa resistència mecànica i tenen un elevat preu de venda.

- **Imants Alnico (AlNiCo):** Imant format per l'aliatge d'Alumini, Níquel i Coure. Els imants Alnico tenen una bona resistència a la temperatura, però poden ser desmagnetitzats amb facilitat. És aquesta darrera propietat que fan que cada cop més els imants Alnico siguin reemplaçats per altres imants fabricats amb terres rares que ofereixen millors propietats.

- **Imants Ceràmics:** També coneguts com imants de ferrita estan fabricats per un compost d'òxid de ferro i carbonat de bar/estronci mitjançant tecnologies de processat de ceràmiques.

Els punts a favor d'aquests tipus d'imants és la seva fàcil producció, el seu baix cost i no són fàcils de desmagnetitzar. Per contra, aquests imants tendeixen a ser fràgils.

Degut al seu baix preu i a les bones propietats que presenten són un dels imants més utilitzats, juntament amb els de Neodimi. Les seves aplicacions va des de l'indústria de l'automòbil a la fabricació d'altaveus.

5.2. Camps magnètics i forces entre imants.

Per calcular la força entre dos imants o el seu camp magnètic existeixen dos models:

- Model d'Ampère.
- Model de Gilbert.

El mètode, segons la física més correcta de càlcul és el mètode d'Àmpère, mentre que el model amb més facilitats per aplicar i el més comunament utilitzat és el mètode de Gilbert.

En el model d'Àmpère, tota magnetització és deguda a l'efecte de microscòpiques, o atòmiques, corrents circulars, també anomenades corrents d'Àmpère. L'efecte d'aquestes corrents circulars microscòpiques és fer que l'imant es comporti com si hi hagués fluint un corrent elèctric macroscòpic formant bucles al voltant de l'imant.

Aplicant el model d'Àmpère es pot trobar el camp magnètic exacte tant dins com a l'exterior de l'imant.

L'inconvenient d'aquest mètode és que normalment és difícil calcular les corrents d'Àmpère a la superfície de l'imant.

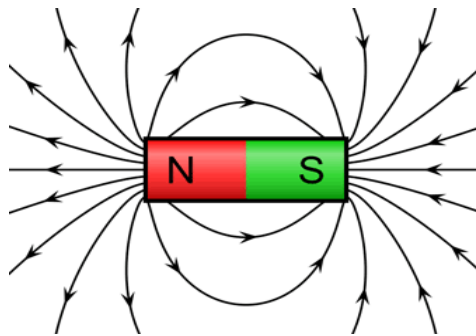


Figura 5.2. Esquema de les corrents d'Àmpère.

En el model de Gilbert, també anomenat model de dipols magnètics, s'utilitza una aproximació del model d'Àmpère. Aquesta aproximació també es considera com a vàlida i és utilitzada per la indústria pel disseny d'imants permanents.

En aquesta aproximació, les superfícies dels pols de l'imant se suposa que estan cobertes de càrrega magnètica. Les partícules del pol nord al nord, i les partícules del pol sud al sud. Si la distribució magnètica és coneguda, llavors el model de pols desenvolupat dona el camp magnètic exacte a l'exterior de l'imant.

Per contra, amb aquest model, el camp magnètic calculat a l'interior del imant no és exacte.

El càlcul de la força d'atracció o repulsió entre dos imants, per norma general, és una operació extremadament difícil. Depèn de la forma, de la magnetització, l'orientació i la separació dels imants.

Amb el mètode de Gilbert, però aquesta operació es fa més simple i només cal conèixer com la càrrega magnètica que està distribuïda en els pols magnètics.

Força entre dos pols magnètics:

$$F = \frac{\mu q_{m1} q_{m2}}{4\pi r^2}$$

On,

F: força entre els dos pols (N).

μ : permeabilitat del medi (H/m).

q_{m1} : càrrega magnètica del pol 1. (A·m)

q_{m2} : càrrega magnètica del pol 2. (A·m)

r: separació entre els dos pols (m).

Aquesta fórmula es pot aplicar en el cas de que tots dos pols siguin el suficientment petits com per poder ser representats com a punts.

Força entre dues superfícies magnetitzades properes d'àrea A:

$$F = \frac{H^2 A \mu_o}{2} = \frac{B^2 A}{2\mu_o}$$

On,

F: força (N)

H: camp magnètic (A/m)

μ_o : permeabilitat del buit ($4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A)

B: densitat del flux (T)

A: àrea de cada superfície (m²)

Força entre dos imants de barra:

$$F = \left[\frac{B_o^2 A^2 (L^2 + R^2)}{\pi \mu_o L^2} \right] \left[\frac{1}{x^2} + \frac{1}{(x + 2L)^2} - \frac{2}{(x + L)^2} \right]$$

$$B_o = \frac{\mu_o}{2} M$$

On,

B_o : flux de densitat magnètic a prop dels pols (T)

A: àrea de cada pol (m²)

L: longitud del imant (m)

R: radi de cada imant (m)

x: separació entre els dos imants (m)

μ_0 : permeabilitat del buit ($4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}$)

M: magnetització dels imants (A/m)

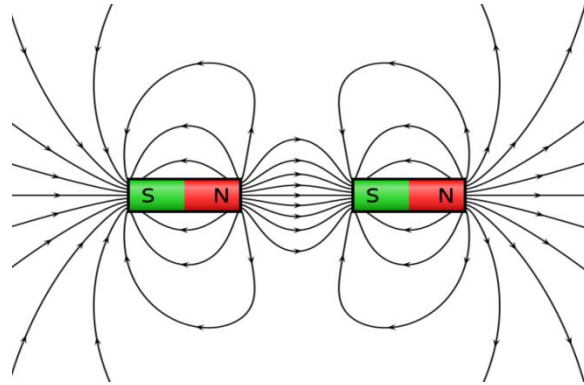


Figura 5.3. Esquema línies magnètiques entre dos imants de barra.

Força entre dos imants cilíndrics:

$$F(x) = \frac{\pi\mu_0}{4} M^2 R^4 \left[\frac{1}{x^2} + \frac{1}{(x+2h)^2} - \frac{2}{(x+h)^2} \right]$$

On R és el radi, h l'alçada i x la distància entre imants.

Per valors petits de x, distància entre els imants, els resultats d'aquesta equació són erronis.

Per evitar aquest error, s'escriu el dipol magnètic efectiu com:

$$m = MV$$

I on V és el volum de l'imant:

$$V = \pi R^2 h$$

Per tant es pot escriure, quan $h \ll x$:

$$F(x) = \frac{3\pi\mu_0}{2} M^2 R^4 h^2 \frac{1}{x^4} = \frac{3\mu_0}{2\pi} M^2 V^2 \frac{1}{x^4} = \frac{3\mu_0}{2\pi} m_1 m_2 \frac{1}{x^4}$$

6. Piezoelèctrics.

La paraula *piezo* és una paraula derivada del grec *piezein*, i el seu significat és pressionar.

Els cristalls dels materials que adquireixen càrrega elèctrica en ser deformada la seva massa, són anomenats piezoelèctrics.

Aquests materials també funcionen a la inversa, és a dir, si són sotmesos a un camp elèctric exterior, la seva massa es deforma, i, en la majoria de casos, recuperar la seva forma quan se li deixa de sotmetre el camp elèctric, aquest efecte es denomina efecte invers.

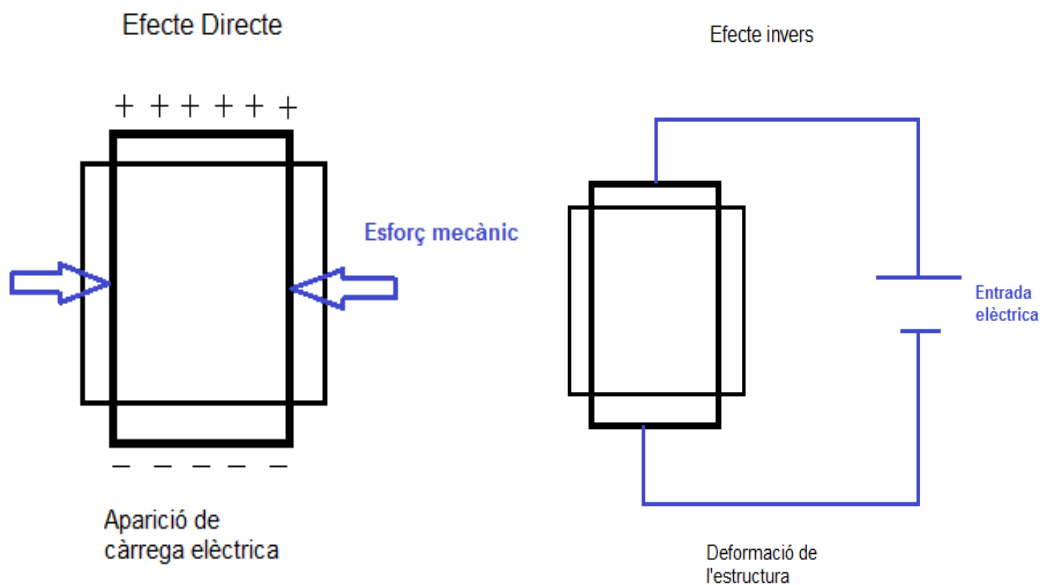


Figura 6.1. Esquema d'efecte directe i efecte invers en piezoelèctrics.

Els materials piezoelèctrics poden ser tant materials sintètics com naturals. Aquests materials tenen la particularitat de no tenir un centre de simetria en la seva estructura interna. És aquesta antisimetria la que en produir-se una deformació en la seva massa es provoca una dislocació dels centres de gravetat de la càrregues elèctriques, tant les positives com les negatives. Com a conseqüència d'aquestes dislocacions apareixen dipols elementals, i les seves superfícies enfrontades sorgeixen càrregues de signe oposat.

6.1. Tipus de materials piezoelèctrics

Al llarg dels anys s'han produït un gran nombre d'investigacions al voltant dels materials piezoelèctrics i la piezoelectricitat. Aquestes investigacions han proporcionat la descoberta de nous materials utilitzant compostos alternatius.

Aquests descobriments s'ha efectuat no només per millorar el rendiment que se li dona a aquests materials si no també per raons mediambientals.

Els materials piezoelèctrics més comunament utilitzats en els darrers anys van ser els cristalls naturals com el quars o la turmalina, utilitzats al llarg del anys com a transductors en aplicacions electromagnètiques.

En l'actualitat la tendència va a la recerca i la utilització de materials piezoelèctrics artificials, com els polímers o els anomenats piezo-compostos. Aquests tipus de materials són més estables als canvis de temperatura i a la humitat que els cristalls naturals. També es té en compte la obtenció de materials lliures de ploms, degut a l'efecte perjudicial que aquest component té per la salut i als canvis que s'estan efectuant en la legislatura.

6.2. Aplicacions de la piezoelectricitat

La història de la piezoelectricitat es remunta a més de 130 anys i les aplicacions dels materials piezoelèctrics en l'actualitat està cada cop més estesa i en àmbits molt diferents:

- Fonts d'alta tensió i potència.
- Sensors.
- Actuadors.
- Motors piezoelèctrics.
- Reducció de vibració so.
- Cirurgia.
- Cel·les fotovoltaïques.
- *Energy Harvesting*.

En la Taula... es mostren alguns materials piezoelèctrics i les seves aplicacions en l'àmbit de l'Energy Harvesting:

Taula 6.1. Tipus de materials piezoelèctrics i aplicacions.

Tipus de material	Aplicació
PZT-5H	Reciclatge de ceràmiques piezoelèctriques usades en sensors electrònics per construir un <i>Energy Harvesting</i> que aprofita el moviment humà.
ZnO	Nano generador <i>Energy Harvesting</i> .
AlN	<i>Energy Harvester</i> d'una viga en voladís excitada per vibració.
PVDF	<i>Energy Harvester</i> de generació d'energia elèctrica a partir de l'energia del vent.
Piezo compostos	<i>Energy Harvesting</i> per vibracions de baixa freqüència.

7. Caracterització del moviment del pèndol.

La caracterització del pèndol que serà utilitzat en el dispositiu estarà basada en el moviment i les equacions que descriu un pèndol físic.

La definició de pèndol físic és la de qualsevol cos rígid que pugui oscil·lar lliurement en un camp gravitatori al voltant d'un eix horitzontal fix, el qual no passa per el seu centre de masses (Figura 7.1).

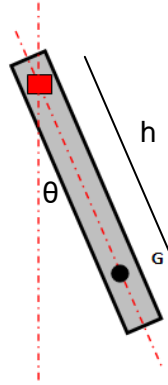


Figura 7.1. Croquis del pèndol físic.

La posició del pèndol queda determinada en tot moment per l'angle θ [radians]. La lletra G defineix el centre de gravetat del pèndol.

La lletra h [m] designa la longitud entre el centre de gravetat al centre de rotació.

Quan el pèndol no està en la seva posició d'equilibri estable, actuen dos forces sobre ell la força del pes (mg [N]) i la força Normal (N [N]).

Calculant el Moment (M_o [N·m]) del centre de rotació, amb m (massa [kg]) i g (gravetat [m/s^2]):

$$M_o = -mgh \sin \theta$$

Amb I_o [$kg \cdot m^2$], moment d'inèrcia del pèndol i acceleració angular α [rad/s^2]:

$$-mgh \sin \theta = I_o \alpha$$

Aplicant el teorema d'Steiner l'equació quedarà de la següent manera:

$$\frac{-mgh \sin \theta}{\alpha} = I_{CM} + mh^2 \quad [1]$$

On I_{CM} [kg·m²] serà el moment d'inèrcia al centre de masses i la m [kg] la massa total del pèndol.

Per a oscil·lacions petites es pot suposar que, $\sin \theta \approx \theta$.

Tenint en compte el disseny en forma de disc de pèndol construït el moment d'inèrcia és:

$$I_{CM} = \frac{1}{2} mR^2 \quad [2]$$

On,

R [m], radi del disc.

Combinant les equacions [1] i [2] obtenim la fórmula que ens permetrà saber la velocitat angular en funció de la posició del pèndol.

$$\alpha = \frac{-gh \sin \theta}{\frac{1}{2} R^2 + h^2} \quad [3]$$

Un cop obtinguda la velocitat angular del pèndol, amb la següent equació es podrà calcular el període del moviment del pèndol.

$$T = \sqrt{\frac{2\pi}{w}} \quad [4]$$

On w és la velocitat angular del pèndol [rad/s].

Equacions del balanç d'energia:

En un primer moment considerarem que el pèndol parteix d'una certa alçada, h (Figura 7.2):

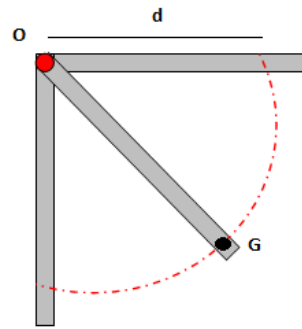


Figura 7.2. Moviment del pèndul partint d'una certa alçada.

Quan el centre de masses del pèndol es troba en horitzontal respecte el centre de rotació tota l'energia serà potencial:

$$E_p = mgh$$

On,

E_p , energia potencial [J]

Si es fa el balanç d'energia en un punt entre la posició horitzontal i vertical ens quedarà la següent expressió:

$$E_{pi} = E_{p\theta} + E_{c\theta}$$

I energia cinètica: $E_c = \frac{1}{2} I_o \omega^2$

On,

E_c energia cinètica, [J]

Desenvolupant aquestes equacions ens queda el balanç d'energia com:

$$mgd = mgd(1 - \cos\theta) + \frac{1}{2} * (\frac{1}{2} m(R^2) + md^2)\omega^2$$

Aïllant ω ,

$$\omega^2 = \frac{2gd\cos\theta}{R^2 + 2d^2} \quad [5]$$

8. Disseny i construcció del dispositiu.

La primera idea de disseny obtinguda va ser la de treballar amb el prototipus de captador d'energia construït amb anterioritat. Però la idea finalment va ser rebutjada ja que treballar amb aquest prototipus es feia difícil a l'hora de fer el muntatge i desmuntatge de les configuracions amb imants.

El disseny de l'anterior prototipus estava dissenyat per estudiar l'energia produïda per piezoelèctrics en xocar amb unes pues, tant en el banc de proves, com en un futur al mar.

Finalment es va decidir partir d'un dispositiu totalment nou que permetés provar les configuracions dels imants amb total llibertat i poden fer múltiples canvis. Les principals premisses que es van tenir en compte en el disseny del dispositiu van ser les següents:

-Moviment basat en un pèndol. El nou dispositiu partirà des de zero, però per mantenir una semblança amb l'anterior captador d'energia, el nou dispositiu estarà basat en el moviment pendolar igual que el seu predecessor. Encara que la distribució de masses i les seves dimensions no seran les mateixes.

-Capacitat per ser provat en condicions que simulin els corrents marins. Al tractar-se d'un primer disseny, el nou dispositiu encara no estarà disposat per fer l'experimentació al medi marí. Per tant, una de les premisses en fer el disseny serà la de que ha de tenir una estructura que permeti fer unes experimentacions que simulin, de la manera més fidedigna possible, els moviments oscil·latoris i la freqüència als quals el prototipus estaria sotmès, tant si estigués al fons marí com a la superfície.

-Llibertat d'efectuar diferents configuracions amb imants. Aquest és el principal factor per el qual es decideix el disseny d'un nou dispositiu. El nou disseny ha de ser versàtil a l'hora de poder provar diferents configuracions amb els imants, ja que s'hauran d'efectuar diverses experimentacions per tal de trobar quina serà la configuració que més convingui al propòsit.

-Disseny robust. El disseny del dispositiu ha de tenir en compte que un cop construït servirà per efectuar diferents experimentacions i per tant ha de tenir un disseny que no es trenqui amb facilitat.

8.1. Part mòbil del dispositiu.

Requisits de la part mòbil tinguts en compte en el disseny:

- Superfície circular uniforme i plana. La part mòbil serà l'encarregada de convertir els moviments oscil·latoris produïts i les forces dels imants utilitzats en moviment giratori.
- Facilitat per ser mecanitzat. A la part mòbil se li afegiran els pesos, per fer de pèndol, i els imants.
- Espai i suport per acoblar-li un rodament.

Per tal de complir amb les premisses prèviament descrites, per construir la part mòbil del dispositiu s'ha optat per treballar amb la superfície d'un disc, que posteriorment serà mecanitzat per tal de complir amb els requisits.

Materials empleats en la construcció de la part mòbil:

- 3 discos.

Característiques dels discos empleats:

- Diàmetre: 120 mm.
- Diàmetre interior: 15 mm.
- Gruix: 1.2 mm.
- Pes aproximat: 15 g.

- 1 Rodament de boles.

Característiques rodament empleat (Taula 8.1):

Taula 8.1. Especificacions rodament empleat.

OPEN AND SHIELDED TYPES DIMENSIONS – TOLERANCES

Bearing Number			Bore d		Outside Diameter D				Width C		Fillet Radius ⁽¹⁾		Wt.		Static Load Rating C ₀		Extended Dynamic Load Rating C _E ⁽²⁾	
open	one shield D	two shield DD	+0.000 mm, -0.008 mm +0.0000", -0.0003"		tolerance +0.000 mm +0.0000" to minus				+0.00 mm, -0.12 mm +0.000", -0.005"									
			mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	kg	lbs.	N	lbs.	N	lbs.
34K	34KD	34KDD	4	0.1575	16	0.6299	0.008	0.0003	5	0.197	0.3	0.012	0.005	0.01	560	125	1630	365
35K	35KD	35KDD	5	0.1969	19	0.7480	0.009	0.00035	6	0.236	0.3	0.012	0.009	0.02	865	195	2450	560
36K	36KD	36KDD	6	0.2362	19	0.7480	0.009	0.00035	6	0.236	0.3	0.012	0.009	0.02	865	195	2450	560
37K	37KD	37KDD	7	0.2756	22	0.8661	0.009	0.00035	7	0.276	0.3	0.012	0.009	0.02	1400	312	3650	830
38K	38KD	38KDD	8	0.3150	22	0.8661	0.009	0.00035	7	0.276	0.3	0.012	0.009	0.02	1400	312	3650	830
38KV	—	—	8	0.3150	24	0.9449	0.009	0.00035	7	0.276	0.3	0.012	0.018	0.04	1370	305	3650	830
39K	39KD	39KDD	9	0.3543	26	1.0236	0.009	0.00035	8	0.315	0.3	0.012	0.018	0.04	1960	440	5000	1120

⁽¹⁾ Maximum shaft or housing fillet radius that bearing corners will clear.

⁽²⁾ Based on 10⁶ revolutions of calculated fatigue life.

S'ha utilitzat un rodament que proporcionés bona capacitat de gir a la part mòbil i que a la vegada coincidís, en la mesura del possible, amb el diàmetre interior del disc.

8.1.1. Muntatge de les parts.

Dos dels discos han estat trepats de la següent manera (Figura 8.1):

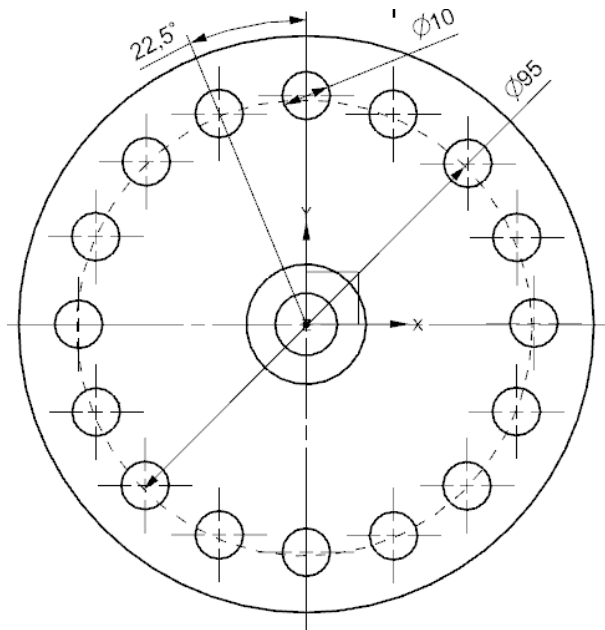


Figura 8.1. Croquis 1 part mòbil prototipus.

S'efectuen un total de 16 forats al voltant del perímetre del disc, formant un diàmetre de 95 mm, i amb un angle entre ells de 22.5° .

Un cop finalitzat el prototip, aquets forats serviran per fer encaixar els imants.

El tercer disc es trepat segons la Figura 8.2:

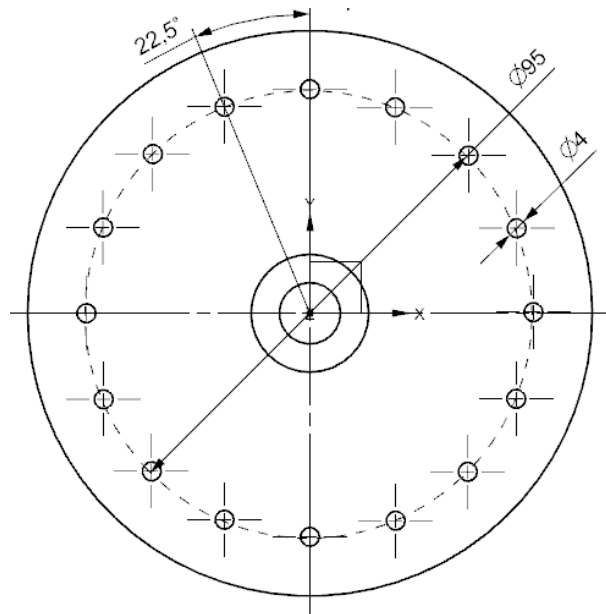


Figura 8.2. Croquis 2 part mòbil prototipus.

Es trepen 16 forats de 4 mm de diàmetre al voltant del perímetre i amb un diàmetre de 95 mm respecte del centre.

Els forats efectuats serviran per poder treure els imants encaixats en els forats fets en els altres dos discos.

Els discos amb els forats trepats de 10 mm són enganxats entre si fent coincidir els forats. Seguidament el tercer disc s'enganxa als altres dos també fent encaixar els seus forats.

El Rodament és encaixat i enganxats als discos prèviament enganxats entre si Figura 8.3

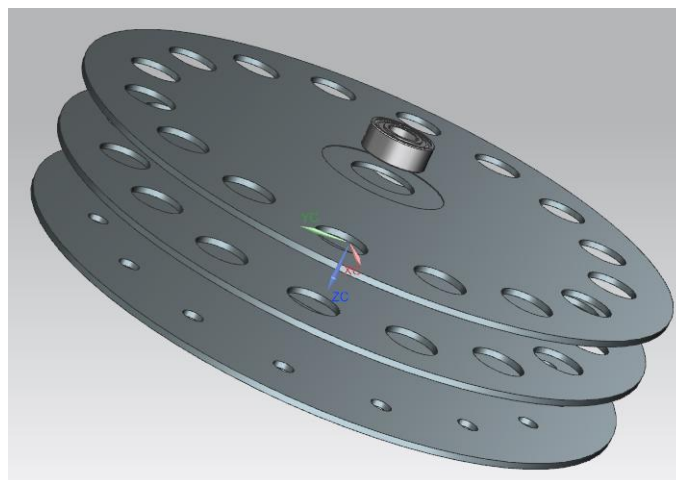


Figura 8.3. Muntatge de la part mòbil.

8.2. Part fixa del dispositiu.

Requisits de la part fixa tinguts en compte en el disseny:

- Superfície circular uniforme i plana. Igual que la part mòbil aquesta part ha d'allotjar imants i tenir capacitat per efectuar diferents configuracions.
- Facilitat per ser mecanitzat.
- Versatilitat del disseny. Per exemple poder canviar la distància entre la part mòbil i la part fixa.
- Capacitat per ser acoblat a la taula del banc de proves que es vol utilitzar.

Materials emprats en la construcció de la part fixa del dispositiu:

- **4 discos.**

Amb les mateixes característiques que els emprats en la construcció de la part mòbil.

- **1 Cargol.**

Característiques del cargol emprat (Taula 8.2):

Taula 8.2. Especificacions Cargol utilitzat.

DIN		Tornillo cabeza hexagonal totalmente roscado	
933			
d	M3	M4	M5
P	0,5	0,7	0,8
k	2	2,8	3,5
s	5,5	7	8
d	M8	M10	M12
P	1,25	1,5	1,75
k	5,3	6,4	7,5
s	13	17	19
d	M18	M20	M22
P	2,5	2,5	2,5
k	11,5	12,5	14
s	27	30	32
d	M27	M30	M33
P	3	3,5	3,5
k	17	18,7	21
s	41	46	50
d	M42	M45	M48
P	4,5	4,5	5
k	26	28	30
s	65	70	75

DIN		009338800		GD 001 002	
933		Tornillo cabeza hexagonal totalmente roscado			
Acero		8.8		M	
d x L	Envase	Lote de venta	Código	Precio €/100 uni.	
M 4 x 8	E	500	384.269		
M 4 x 10	E	500	390.366		
M 4 x 12	E	500	404.597		
M 4 x 16	E	500	464.794		
M 4 x 20	E	500	372.924		
M 4 x 25	E	500	379.024		
M 4 x 30	E	500	391.220		
M 4 x 35	E	500	391.221		
M 4 x 40	E	500	403.417		
M 4 x 50	E	500	409.515		
M 5 x 8	E	200	417.647		
M 5 x 10	E	200	423.745		
M 5 x 12	E	200	435.942		
M 5 x 16	E	200	442.041		
M 5 x 18	E	200	448.139		

El cargol havia de tenir una certa longitud degut a que haurà de contenir el rodament de la part mòbil i una part de la part fixa en ell.

El cargol escollit és un cargol DIN 933, amb un mètric M4 i una longitud de 8mm.

- 5 Rosques.

Característiques de les rosques empleades (Taula 8.3):

Taula 8.3. Especificacions rosques utilitzades.

d	M2,6*	M3	M3,5	M4	M5	M6
P	0,45	0,5	0,6	0,7	0,8	1
m	2	2,4	2,8	3,2	4	5
s	5	5,5	6	7	8	10
d	M7	M8	M10	M10*	M12	M14
P	1	1,25	1,5	1,5	1,75	2
m	5,5	6,5	8	8	10	11
s	11	13	17	15	19	22
d	M16	M18	M20	M22	M24	M27
P	2	2,5	2,5	2,5	3	3
m	13	15	16	18	19	22
s	24	27	30	32	36	41
d	M30	M33	M36	M39	M42	M45
P	3,5	3,5	4	4	4,5	4,5
m	24	26	29	31	34	36
s	46	50	55	60	65	70
d	M48	M52	M56	M60	M64	M68
P	5	5	5,5	5,5	6	6
m	38	42	45	48	51	54
s	75	80	85	90	95	100
d	M72x6	M76x6	M80x6	M90x6	M100x6	M110x6
P	6	6	6	6	6	6
m	58	61	64	72	80	88
s	105	110	115	130	145	155

* No acorde a DIN.

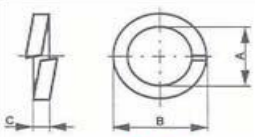
S'han escollit un total de 5 rosques de mida compatible amb el cargol seleccionat.

Les rosques són DIN 934 de mètric 4 mm.

- 2 volanderes helicoidals de pressió.

Característiques (Taula 8.4):

Taula 8.4. Especificacions volanderes helicoidals de pressió.



	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M10	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30	M33	M36	M39	M42	M45	M48	M52	M56	M60	M64	M68	M72
	-	3/32	3/16	-	-	5/16	3/8	-	9/16	5/8	11/16	3/4	7/8	-	-	1 1/8	1 1/4	1 3/8	1 1/2	1 5/8	1 3/4	-	2	2 1/4	-	2 1/2	-	2 3/4
A (mín.)	3,1	4,1	5,1	6,1	7,1	8,1	10,2	12,2	14,2	16,2	18,2	20,2	22,5	24,5	27,5	30,5	33,5	36,5	39,5	42,5	45,5	49	53	57	61	65	69	73
B (máx.)	6,2	7,6	9,2	11,8	12,8	14,8	18,1	21,1	24,1	27,4	29,4	33,6	35,9	40	43	48,2	55,2	58,2	61,2	68,2	71,2	75	83	87	91	95	99	103
C	0,8	0,9	1,2	1,6	1,6	2	2,2	2,5	3	3,5	3,5	4	4	5	5	6	6	6	6	7	7	7	8	8	8	8	8	8

(Todas las medidas están expresadas en mm.)

Especificacions

Material: Acer inoxidable A2.

Normatives

DIN: 127 B.

NEN: 1197 B.

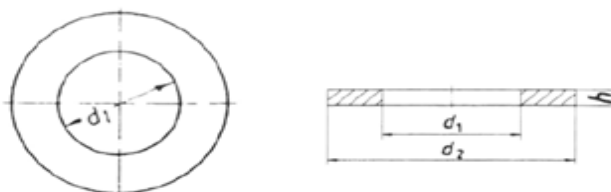
NF: E25-515.

S'han escollit aquestes volanderes per fixar el rodament, amb l'ajut de les rosques, a la part superior del cargol. D'aquesta manera el rodament quedarà fix subjectant el seu radi interior a les volanderes.

En les mesures de la volandera escollida s'ha tingut en compte el diàmetre interior del rodament.

- 2 volanderes planes.

Taula 8.5. Especificacions volanderes planes.



M	d1	d2	h
1,6	1,7	4	0,3
2	2,2	5	0,3
2,5	2,7	6,5	0,5
3	3,2	7	0,5
3,5	3,7	8	0,5
4	4,3	9	0,8
5	5,3	10	1
6	6,4	12	1,6

Aquestes dues volanderes serviran per ajustar els 4 discos al cargol de manera que quedin plans.

- **Peça de Polipropilè.**

Les dimensions de la peça (Figura 8.4) són les següents: 160 mm de longitud, 85 mm d'ample i un gruix de 10 mm

El pes aproximat de la peça és de 120 g.

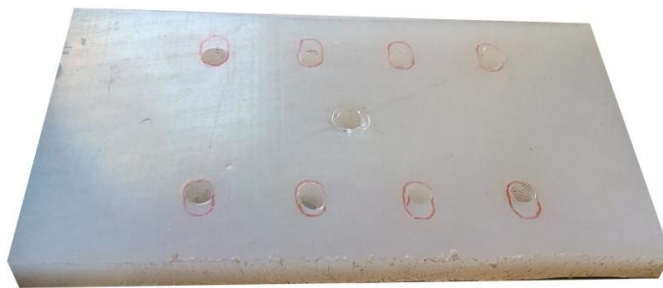


Figura 8.4. Peça de polipropilè.

Aquesta peça servirà com suport per el cargol amb la part mòbil i la part fixa.

8.2.1. Muntatge de les parts.

Els discs és munten de la mateixa manera que en la part mòbil. 3 discs són trepats amb forats de diàmetre 10 mm i el disc restant és trepat amb forats de 4 mm.

Els 3 discs amb el forats de 10 mm són enganxats fent coincidir els forats trepats.

El disc restant amb forats de diàmetre 4 mm es enganxats als altres 3.

Seguidament es fa passar la part mòbil pel cargol, de manera que quedi envoltada per les dues volanderes de pressió i subjectat amb una rosca (Figura 8.5).

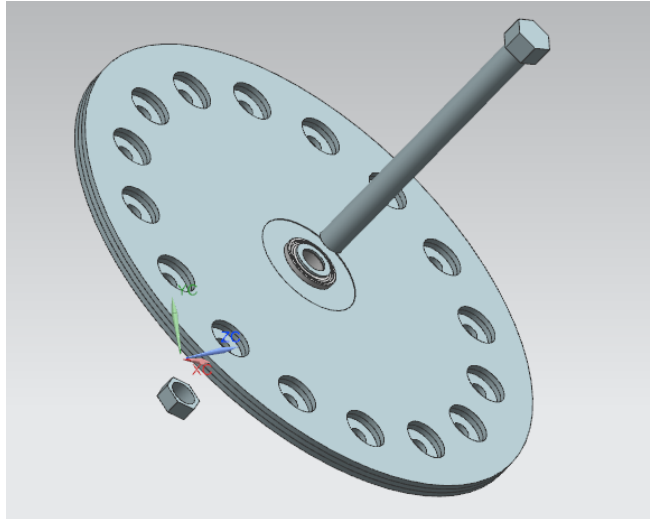


Figura 8.5. Muntatge part fixa 1.

Es cargolen dos rosques més al cargol (això servirà com a referència per saber la distància a la qual estan les dues parts).

Als 4 discs prèviament enganxats se li enganxa una rosca al centre, fent servir cola calenta.

Al tenir al mig una rosca es podrà enroscar i desenroscar per variar la distància entre les dues parts.

Un cop enganxada la rosca, s'enrosquen els 4 discs al cargol fixant-los amb una rosca a cada banda (Figura 8.6).

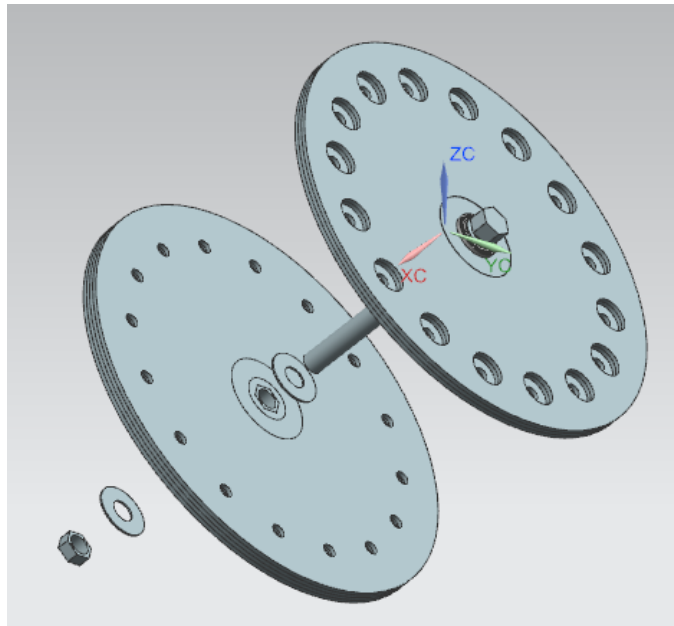


Figura 8.6. Muntatge part fixa 2.

Per últim, a la base de polipropilè se li trepa un forat del mateix diàmetre que el mètric del cargol.

Al muntatge prèviament construït se li afegeix la base amb l'ajut de dos rosques més (Figura 8.7).

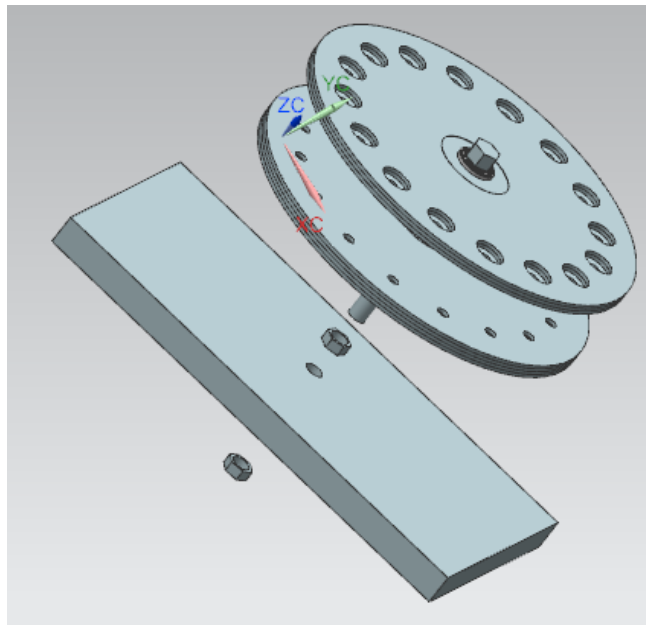


Figura 8.7. Muntatge part fixa 3.

8.3. Suport per la taula de proves.

Per acoblar el dispositiu fins ara construït a la taula de proves s'ha fet servir una peça feta d'una canonada de PVC.

Aquesta peça permetrà traslladar els moviments oscil·latoris de la taula al dispositiu i així poder provar el seu comportament amb diferents amplituds i freqüències.

La forma circular de la canonada farà que en acoblar-se a la taula transmetrà un moviment de balanceig a la part mòbil i a la part fixa de prototipus.

Característiques de la peça (Figura 8.8):

Material: PVC

Diàmetre: 180 mm

Pes aproximat: 135 g.

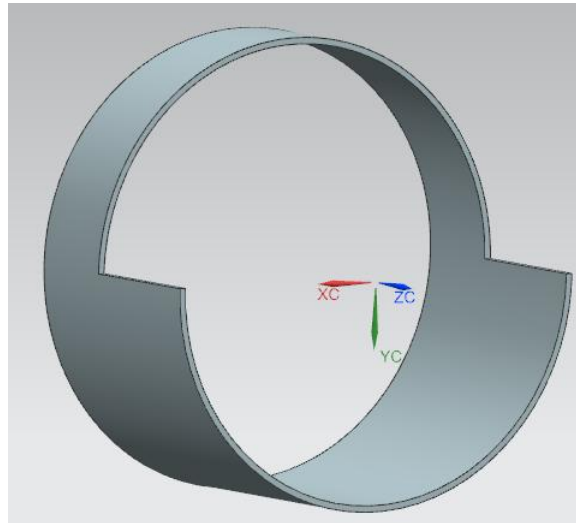


Figura 8.8. Suport per la taula de proves.

8.3.1. Muntatge del suport.

La peça de PVC es munta amb la resta del dispositiu amb cola de calor. La base de polipropilè amb tot el muntatge construït prèviament és acoblat al radi interior de la peça.

En la Figura 8.9 es pot observar el muntatge definitiu:



Figura 8.9. Muntatge definitiu del prototipus.

9. Caracterització dels imants empleats.

Els imants que seran utilitzats durant la part experimental seran imants de neodimi amb forma de disc (Figura 9.1) i proporcionats per l'empresa *Eclipse*.



Figura 9.1. Imants Eclipse en forma de disc.

Les característiques tècniques dels imants són les següents:

- Diàmetre: 10 mm
- Gruix: 5 mm.
- Material: NdFeBr – Neodimi-Ferro-Bor.
- Força de tracció 2.5 kg.
- Imant de grau N35.

Els imants escollits són de magnetització axial, és a dir, tenen el pol nord i el sud en les seves superfícies circulars planes (Figura 9.2).

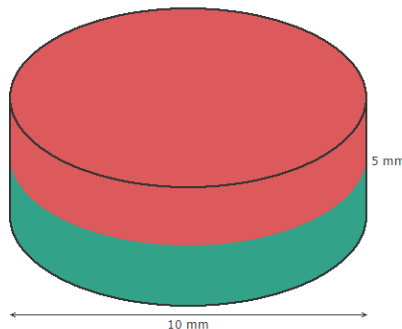


Figura 9.2. Tipus de magnetització de l'imant escollit.

Propietats magnètiques característiques a temperatura ambient (20°C):

Taula 9.1. Propietats magnètiques del imants N35.

Romanència B_r		Coercivitat		Energia Màxima	
kGs	T	kOe	kA/m	MGOe	kJ/m ³
12.2	1.22	11.2	891	35	279

- La romanència magnètica (B_r) és la magnetització que resta a un material quan desapareix el camp magnètic.
- La coercitivitat és la mesura de la capacitat que té un material ferromagnètic o ferroelèctric de mantenir un camp magnètic extern o un camp elèctric.

Altres propietats a temperatura ambient (20°C):

Taula 9.2. Propietats imants de Neodimi.

Densitat	7.4-7.6 g/cm ³	Temperatura de Curie	310-340 °C
Duresa Vickers	570 Hv	Resistivitat elèctrica	144 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$
Resistència a la tracció	8.0 kg/mm ²	Conductivitat tèrmica	7.7 kcal/(m·h·°C)
Calor específic	0.12 kCal/(kg·°C)	Rigidesa	0.64 N/m ²
Mòdul de Young	$1.6 \cdot 10^{11}$ N/m ²	Temp. màx de treball	80°C

De l'apartat 5.2. *Forces magnètiques entre imants* s'extreu la formula:

$$F(x) = \frac{3\mu_0}{2\pi} m_1 m_2 \frac{1}{x^4}$$

On, $m = MV$

En aplicar la formula per a unes determinades distàncies s'obtindrà la Força d'atracció entre dos imants cilíndrics per a diferents distàncies (x [m]):

Taula 9.3. Resultats de la força entre imants per a diferents distàncies.

x (m)	μ_0 (T·m/A)	V_1 (m ³)	V_2 (m ³)	M (A/m)	m_1 (A·m ²)	m_2 (A·m ²)	F (N)
0,01	$4\pi * 10^{-7}$	$3.88*10^{-6}$	$3.88*10^{-6}$	891000	0,35	0,35	7,34
0,02	$4\pi * 10^{-7}$	$3.88*10^{-6}$	$3.88*10^{-6}$	891000	0,35	0,35	0,46
0,03	$4\pi * 10^{-7}$	$3.88*10^{-6}$	$3.88*10^{-6}$	891000	0,35	0,35	0,09
0,04	$4\pi * 10^{-7}$	$3.88*10^{-6}$	$3.88*10^{-6}$	891000	0,35	0,35	0,03
0,05	$4\pi * 10^{-7}$	$3.88*10^{-6}$	$3.88*10^{-6}$	891000	0,35	0,35	0,01

10. Experimentació: Tests de gir.

10.1. Tests en la taula de proves.

Per comprovar la validesa del dispositiu construït s'ha decidit fer l'experimentació sobre una taula mòbil (taula d'oscil·lacions), la qual es pot variar la freqüència i l'amplitud de les seves oscil·lacions. Amb la modificació d'aquestes dues variables s'intentarà simular els moviments que seran transmesos del mar a la boia per tal de poder extreure conclusions.

Els tests consistiran en fer un recompte de les voltes que farà la part mòbil en un interval de temps definit i amb diferents configuracions magnètiques.

El dispositiu de captador d'energia s'ha acoblat a la taula amb un braç metàl·lic que li transmetrà els moviments de la taula (Figura 10.1).

Per controlar els moviments de la taula, amplitud i freqüència, s'utilitzarà un oscil·loscopi per poder observar els paràmetres els quals s'està treballant.

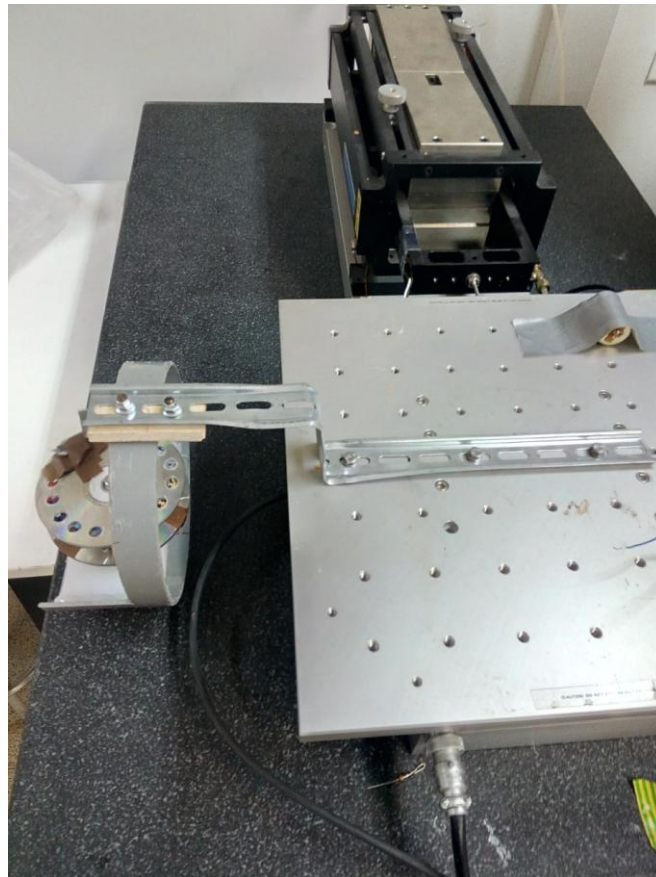


Figura 10.1. Dispositiu acoblat a la taula de proves.

El recompte de voltes que farà la part mòbil s'enregistrarà amb una càmera fixa situada sobre el muntatge i que gravarà cada test efectuat a càmera lenta.

La part mòbil del dispositiu estarà marcada amb línies de referència per poder efectuar el recompte (Figura 11.2).



Figura 10.2. Disc amb línies per fer el recompte de voltes.

10.2. Test de gir 1.

Aquest test servirà com a primer test per observar els girs efectuats i si s'ha de fer alguna millora en la càrrega de pes o en algun altre aspecte del disseny del dispositiu.

10.2.1. Configuració del prototipus 1.

-Sense configuració magnètica.

-Càrrega puntual de 0.030 kg i amb unes dimensions aproximades de 3.5 cm x1.5 cm x 0.5 cm.

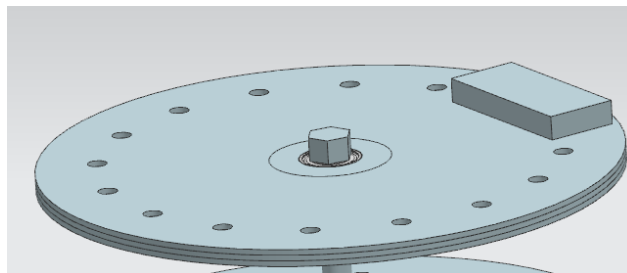


Figura 10.3. Situació de la càrrega puntual al disc.

La Taula 10.1 mostra els resultats obtinguts durant el test:

Taula 10.1. Número voltes completes Prova 10.2.1.

Prova	Freqüència f (mHz)	Període T (s)	Amplitud (mV)	Número de voltes completes
1	500	2	506	15,75
2	500	2	606	16
3	500	2	694	16
4	250	4	513	5
5	142,86	7	516	5
6	142,86	7	606	3
7	142,86	7	722	4
8	142,86	7	797	3
9	142,86	7	925	2
10	142,86	7	1000	1
11	200	5	603	6
12	200	5	738	2
13	200	5	813	2
14	200	5	913	2
15	200	5	1000	1
16	333,33	3	494	3
17	333,33	3	613	6

El temps emprat per cada prova és de 30 segons.

En els resultats obtinguts es pot observar que a freqüències altes (500 mHz) la part mòbil efectua més girs. També s'ha observat que a les probes efectuades a $T = 2\text{s}$ la part mòbil efectua girs en un mateix sentit.

En variar l'amplitud en freqüències baixes es pot observar que pràcticament els resultats són el mateixos (de 15,75 a 16 voltes).

En variar l'amplitud en freqüències inferiors a 500 mHz es pot observar que a més amplitud el número de voltes completes efectuades baixa.

Per fer el càlcul de velocitat de gir s'ha utilitzat la següent fórmula:

$$n = \frac{\text{número de voltes completes}}{30 \text{ (s)}}$$

Les velocitats obtingudes a altes freqüències (500 mHz) són les següents (Taula 10.2):

Taula 10.2. Resultats velocitats 10.2.1.

Prova	Freqüència f (mHz)	Període T (s)	Amplitud (mV)	Velocitat n (rps)
1	500	2	500	0,53
2	500	2	600	0,53
3	500	2	700	0,53

A la taula es pot observar que per freqüències de 500 mHz i variant l'amplitud de 500 mV a 700 mV la velocitat de gir es manté constant en $n = 0.53$ rps.

En les probes efectuades a baixes freqüències (inferiors a 500 mHz) s'observa que la part mòbil del dispositiu no efectua voltes en un mateix sentit, tampoc les voltes efectuades no són sempre completes.

Aquests moviments efectuats a freqüències baixes no serien els moviments ideals ja que es perd molta energia en el canvi de sentit del gir.

Per calcular la velocitat de gir s'ha agafat el temps en efectuar mitja volta, donada la dificultat en trobar voltes completes i en un mateix sentit.

La fórmula emprada per el càlcul de la velocitat de gir:

$$n = \frac{0.5 \text{ (voltes)}}{\text{Temps en efectuar } \frac{1}{2} \text{ volta (s)}}$$

La Taula 10.3 mostra la velocitat de gir obtinguda en freqüències baixes:

Taula 10.3. Resultats velocitats (2) 10.2.1.

Prova	Freqüència f (mHz)	Període T (s)	Amplitud (mV)	Temps en efectuar 1/2 volta (s)	Velocitat n (rps)
4	250	4	513	0,94	0,53
5	142,86	7	516	0,94	0,53
6	142,86	7	606	1,31	0,38
7	142,86	7	722	1,31	0,38
8	142,86	7	797	1,13	0,44
9	142,86	7	925	1,13	0,44
10	142,86	7	1000	1,13	0,44
11	200	5	603	1,31	0,38
12	200	5	738	1,31	0,38
13	200	5	813	0,94	0,53
14	200	5	913	1,13	0,44
15	200	5	1000	1,13	0,44
16	333,33	3	494	1,31	0,38
17	333,33	3	613	0,94	0,53

Els resultats obtinguts en freqüències baixes (de 143 mHz a 333 mHz), en quant a les velocitats obtingudes, són similars a les freqüències altes, encara que es pot observar que a menor freqüència la velocitat va disminuint en la majoria de casos.

Les velocitats més altes aconseguides (0.53 rps) s'han obtingut amb les següents variables:

- T= 4s; A= 513 mV.
- T= 7s; A= 516 mV.
- T= 5s; A= 813 mV.
- T= 3s; A= 613 mV.

Les velocitats que s'obtenen en aquests últims quatre casos esmentats són iguals que les velocitats obtingudes amb freqüències altes. Però el principal problema observat en treballar amb freqüències baixes és la dificultat de la part mòbil per efectuar girs sencers i en un mateix sentit de manera regular.

10.3. Test de gir 2.

En aquest test es mantindrà la càrrega puntual, però s'afegeix una configuració amb els imants per observar canvis en el moviment de la part mòbil respecte al test número 1.

10.3.1. Configuració del prototipus 2.

- A la part mòbil se li ha aplicat un càrrega puntual de 0.030 kg, igual que al test número 1.
- La distància entre la superior i inferior és de 16mm.
- La configuració dels imants és la següent (Figura 10.4):

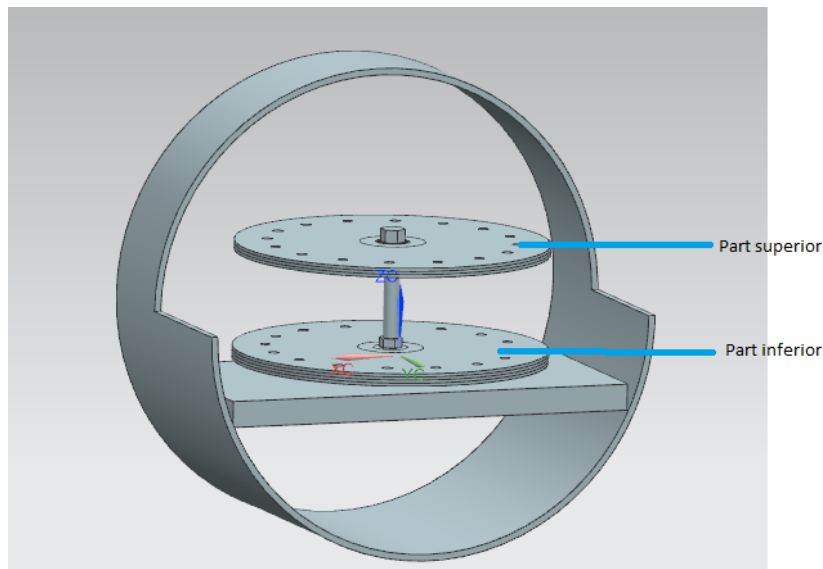


Figura 10.4. Part superior i part inferior del prototipus.

- Configuració de la part superior (Figura 10.5):

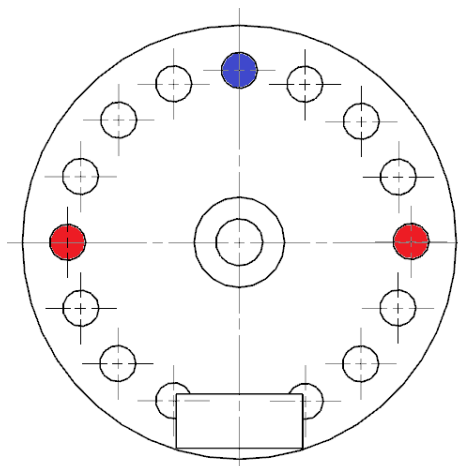


Figura 10.5. Configuració part superior.

- Configuració de la part inferior (Figura 10.6):

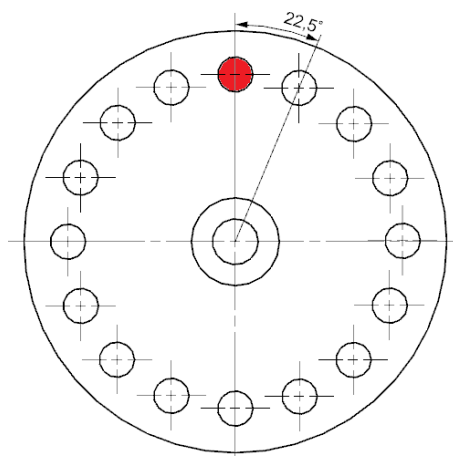


Figura 10.6. Configuració part inferior.

La configuració dels imants s'efectua d'aquesta manera en base al gir efectuat en el test número 1. En la representació gràfica efectuada, els imants vermells col·locats a la part mòbil i a la part fixa es repel·leixen, mentre que el blau de la part mòbil representen que es repel·leixen.

En el segon test no s'han pogut llegir la velocitat de la part mòbil, ja que la configuració magnètica utilitzada juntament amb el pes ha fet que el gir de la part mòbil fora pràcticament nul (no arribava a donar un quart de volta).

El test s'ha efectuat amb les següents freqüències i amplituds (Taula 10.4).

Taula 10.4. Paràmetres taula de proves 10.3.1.

Prova	Freqüència f (mHz)	Període T (s)	Amplitud (mV)
1	500	2	500
2	500	2	600
3	500	2	700
4	333,33	3	500
5	333,33	3	600
6	200	5	600
7	200	5	700
8	200	5	800
9	200	5	900
10	200	5	1000

11	142,86	7	500
12	142,86	7	700
13	142,86	7	800
14	142,86	7	1000

10.4. Test de gir 3.

Per la realització d'aquest test s'ha optat per canviar la metodologia de les probes. En comptes de tenir un pes puntual s'ha optat per repartir el pes, formant un angle de pràcticament 180° al voltant del disc, també totes les probes es realitzaran a la mateixa freqüència i amplitud i el que s'anirà canviant són les configuracions dels imans.

Les voltes efectuades i la seva velocitat s'enregistrarà de la mateixa manera que en els anteriors tests.

10.4.1. Prova 4.1.

Servirà com a prova de referència i el prototipus només disposarà de la càrrega de pes, però sense configuració magnètica.

- La càrrega aplicada a la part mòbil té un volum aproximat de 12000 mm³ i un pes de 0.14 kg, la massa del pes no està uniformement repartida (per evitar que pèndol quedi equilibrat i això faci que es supprimeixi el gir) i forma un angle aproximat de 180° (Figura 10.7).

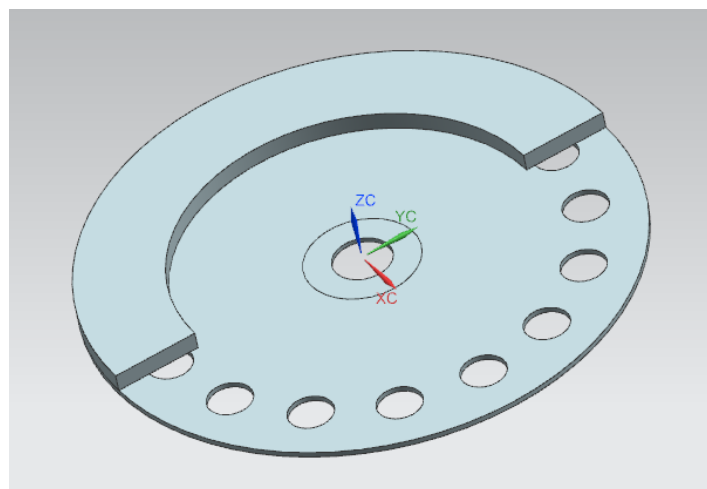


Figura 10.7. Càrrega test de gir 2.

- La distància entre la part superior (part mòbil) i la part inferior (part fixa) és de 16 mm.
- La prova es fa amb una freqüència i amplitud predeterminada: $f = 400$ mHz; $A = 580$ mV.

10.4.1.1. Resultats Prova 4.1.

Taula 10.5. Resultat velocitat Prova 4.1.

Prova	Freqüència f (mHz)	Període T (s)	Amplitud (mV)	Número voltes	Velocitat n (rps)
1	400	2,5	580	11,125	0,371

En fer la prova a aquesta freqüència i amplitud s'aconsegueix que la part mòbil giri sempre en un mateix sentit i de manera pràcticament uniforme.

Per fer el càlcul de la velocitat s'ha fet un recompte de les voltes efectuades i s'ha dividit pel temps de la prova (30s).

$$n = \frac{\text{Número de voltes}}{30 \text{ s}}$$

10.4.2. Prova 4.2.

- La càrrega aplicada en aquesta prova és igual a la de la prova 4.1 i igualment repartida.
- La distància entre la part superior (part mòbil) i la part inferior (part fixa) és de 16 mm.
- La prova es fa amb una freqüència i amplitud predeterminada: $f = 400$ mHz; $A = 580$ mV.
- La configuració dels imants és la de la Figura 10.8.

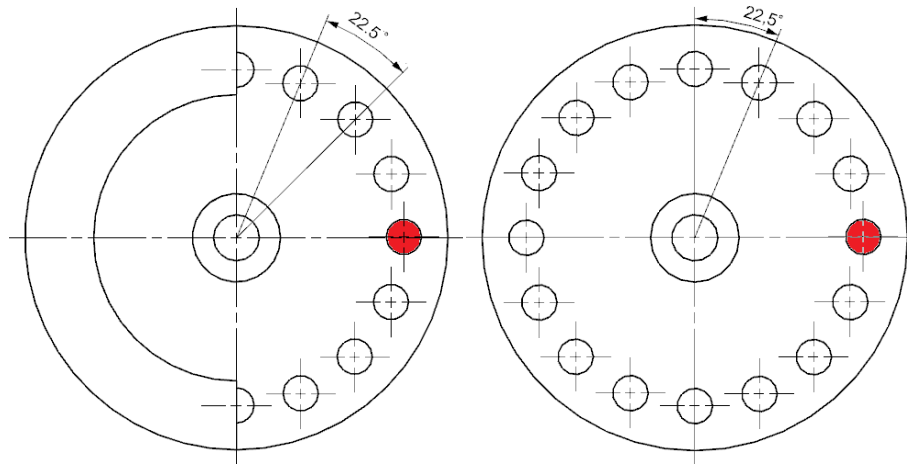


Figura 10.8. Configuració magnètica Prova 4.2. (Esquerra disc superior/Dreta disc inferior)

La part superior està carregada amb un imant situat a 180° respecte de la massa.

La part inferior està carregada amb un imant situat a 90° respecte de la vertical.

Els dos imants estan orientats de manera que es repel·leixen.

10.4.2.1. Resultats Prova 4.2.

Taula 10.6. Resultats velocitats Prova 4.2.

Prova	Frecuència f (mHz)	Període T (s)	Amplitud (mV)	número voltes	velocitat n (rps)
2 (a)	400	2,5	581	10,125	0,338
2 (b)	400	2,5	582	11	0,367

S'han fet dues gravacions per aquesta prova per veure si hi havia variacions en el gir.

Els resultats demostren que la variació és molt petita (no arriba a una volta de diferència).

Igual que succeïa a la prova 4.1, el gir només es produeix en un sentit i la velocitat de les voltes és uniforme.

La velocitat del gir s'ha calculat de la mateixa manera que en la prova 4.1:

$$n = \frac{\text{Número de voltes}}{30 \text{ s}}$$

Els resultats obtinguts de les velocitats demostren que la velocitat de gir és lleugerament inferior a la de la prova 4.1.

10.4.3. Prova 4.3.

- La càrrega aplicada en aquesta prova és igual a la de la prova 4.1 i igualment repartida.
- La distància entre la part superior (part mòbil) i la part inferior (part fixa) és de 16 mm.
- La prova es fa amb una freqüència i amplitud predeterminada: $f = 400$ mHz; $A = 580$ mV.
- La configuració dels imants és la de la Figura 10.9.

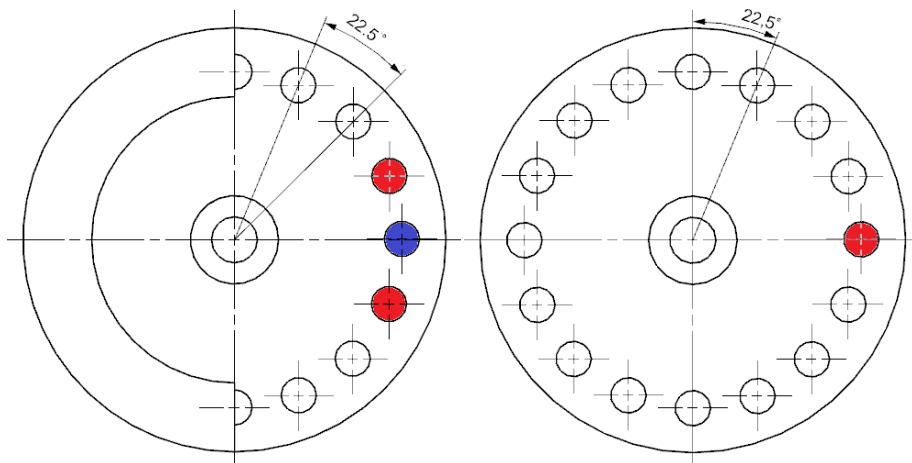


Figura 10.9. Configuració magnètica Prova 4.3. (Esquerra disc superior/Dreta disc inferior)

La part superior (imatge de l'esquerra) està carregada amb un imant situat a 180° respecte de la massa (imant blau), i dos més a $22,5^\circ$ a cada costat d'aquest, però de diferent orientació (imants blaus).

La part inferior està carregada amb un imant situat a 90° respecte de la vertical de manera que s'atreu amb el imant blau i es repel·leix amb els altres dos.

10.4.3.1. Resultats Prova 4.3.

En aquesta prova no s'han pogut extreure resultats ja que el moviment efectuat per la part mòbil era gairebé nul. La disposició dels imants amb aquesta distribució de pes, juntament amb la freqüència i amplitud utilitzada fa que el sistema quedi equilibrat.

10.4.4. Prova 4.4.

- La càrrega aplicada en aquesta prova és igual a la de la prova 4.1 i igualment repartida.
- La distància entre la part superior (part mòbil) i la part inferior (part fixa) és de 16 mm.
- La prova es fa amb una freqüència i amplitud predeterminada: $f = 400$ mHz; $A = 580$ mV.
- La configuració dels imants és la de la Figura 10.10:

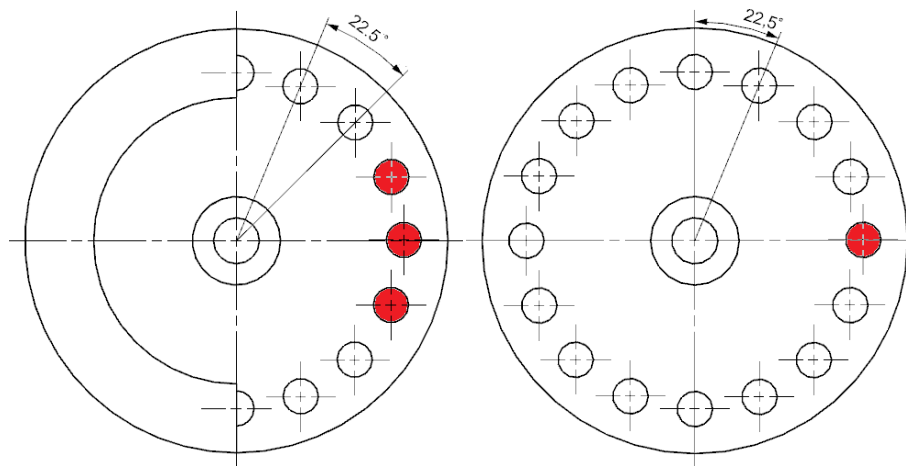


Figura 10.10. Configuració magnètica Prova 4.4. (Esquerra disc superior/Dreta disc inferior)

La part superior (imatge de l'esquerra) està carregada amb tres imants orientats en el mateix sentit i situats a $22,5^\circ$ entre ells i a 180° del pes.

La part inferior està carregada amb un imant situat a 90° respecte de la vertical.

Els imants de la part superior i inferior estan orientats de manera que es repel·leixen.

10.4.4.1. Resultats Prova 4.4.

En realitzar la prova amb aquesta configuració magnètica es pot apreciar que la part mòbil no sempre fa voltes completes i tampoc en un mateix sentit.

Per calcular la velocitat de gir s'han agafat els temps que triga en fer voltes completes.

Taula 10.7. Resultats velocitats Prova 4.4.

Volta	Temps en efectuar 1 volta (s)	Velocitat n (rps)
1	2.251	0.444
2	2,627	0,381
3	2,064	0,485
4	1,876	0,533
5	1,876	0,533

En la realització d'aquesta prova, la part mòbil del mecanisme efectua un total de 5 voltes completes en els 30 segons que dura la prova.

No totes les voltes són en el mateix sentit i tampoc són consecutives.

Per calcular la velocitat s'ha aplicat la següent fórmula:

$$n = \frac{1 \text{ volta}}{\text{temps en efectuar 1 volta}}$$

Els temps en fer una volta completa van de 1.876 s a 2.627 s i les velocitats de gir calculades van de 0.381 rps a 0.533 rps.

En la següent taula es pot veure una comparativa de les velocitats de gir de les proves efectuades:

Prova	1	2	3	4
Velocitat n (rps)	0.371	0.338	--	0.533

taula 10.8. Resultats velocitats (2) Prova 4.4.

Per la realització de la comparativa s'han agafat les velocitats de gir més altes de les diferents proves.

Es pot observar a la taula que la velocitat de gir aconseguida en la prova 4 és notablement superior a les obtingudes en les anteriors proves.

10.4.5. Prova 4.5.

- La càrrega aplicada en aquesta prova és igual a la de la prova 4.1 i igualment repartida.
- La distància entre la part superior (part mòbil) i la part inferior (part fixa) és de 16 mm.
- La prova es fa amb una freqüència i amplitud predeterminada: $f = 400 \text{ mHz}$; $A = 580 \text{ mV}$.
- La configuració dels imants és la següent (Figura 10.11).

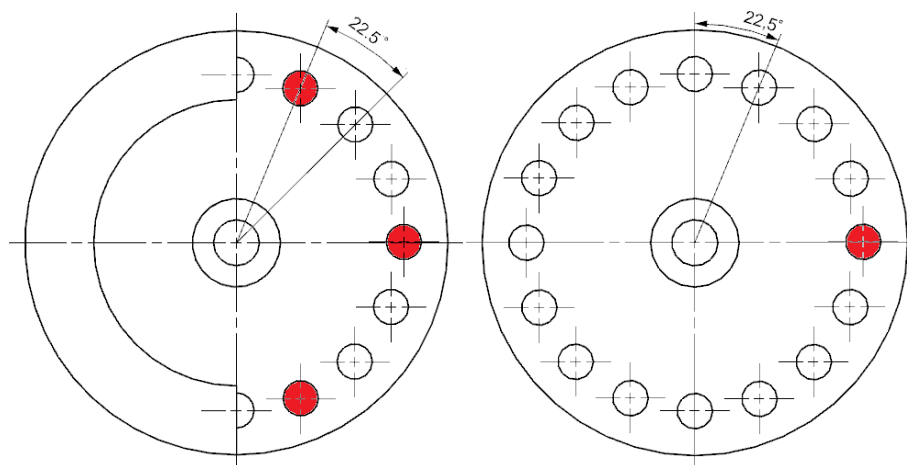


Figura 10.11. Configuració magnètica Prova 4.5. (Esquerra disc superior/Dreta disc inferior)

La part superior (imatge de l'esquerra) està carregada amb dos imants situats a $22,5^\circ$ de la vertical, i un tercer imant situat a 180° del pes. Tots tres imants estan orientats amb el mateix sentit.

La part inferior està carregada amb un imant situat a 90° respecte de la vertical. Els imants de la part superior i inferior estan orientats de manera que es repel·leixen.

10.4.5.1. Resultats Prova 4.5.

Aquesta configuració dels imants amb aquesta freqüència i amplitud, i a la distància que es troben les dues parts, fa que el mecanisme no efectui cap tipus de gir.

10.4.6. Prova 4.6.

- La càrrega aplicada en aquesta prova és igual a la de la prova 4.1 i igualment repartida.
- La distància entre la part superior (part mòbil) i la part inferior (part fixa) és de 16 mm.
- La prova es fa amb una freqüència i amplitud predeterminada: $f = 400$ mHz; $A = 580$ mV.
- La configuració dels imants és la de la Figura 10.12:

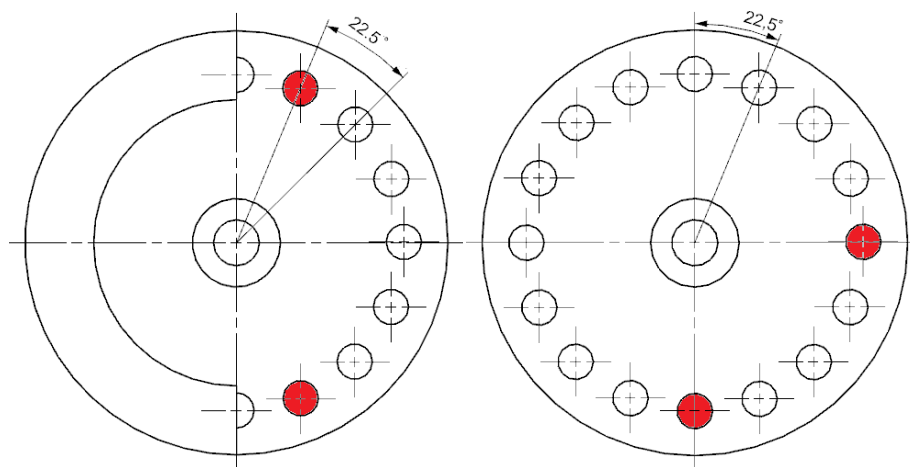


Figura 10.12. Configuració magnètica Prova 4.6. (Esquerra disc superior/Dreta disc inferior)

La part superior (imatge de l'esquerra) està carregada amb dos imants situats a $22,5^\circ$ de la vertical. Els dos imants estan orientats amb el mateix sentit.

La part inferior està carregada amb un imant situat a 90° respecte de la vertical i un segon imant situat a 90° del primer.

Els imants de la part superior i inferior estan orientats de manera que es repel·leixen.

Amb aquesta configuració s'intenta evitar la simetria obtinguda en l'anterior prova (Prova 4.5) i que el sistema s'equilibri i que per tant no giri.

10.4.6.1. Resultats Prova 4.6.

En els vídeos enregistrats d'aquesta prova es pot observar que la part mòbil només efectua girs inferiors a 90° . El mecanisme no es queda en equilibri i s'anul·la el moviment com en la Prova 4.5, però el mecanisme no té el suficient gir com per extreure resultats.

10.4.7. Prova 4.7.

- La càrrega aplicada en aquesta prova és igual a la de la prova 4.1 i igualment repartida.
- La distància entre la part superior (part mòbil) i la part inferior (part fixa) és de 16 mm.
- La prova es fa amb una freqüència i amplitud predeterminada: $f = 400 \text{ mHz}$; $A = 580 \text{ mV}$.
- La configuració dels imants és la de la Figura 10.13:

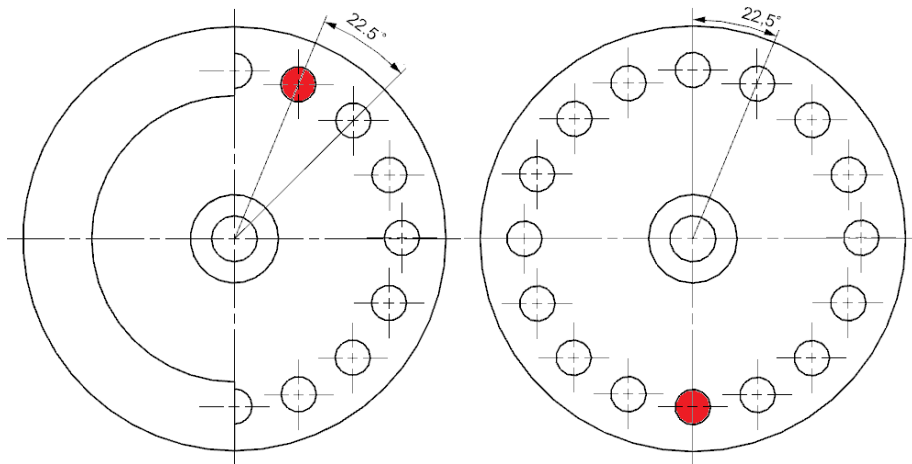


Figura 10.13. Configuració magnètica Prova 4.7. (Esquerra disc superior/Dreta disc inferior)

La part superior (imatge de l'esquerra) està carregada amb un imant situat a $22,5^\circ$ respecte a la vertical.

La part inferior està carregada amb un imant situat a la vertical.

Els imants de la part superior i inferior estan orientats de manera que es repel·leixen.

En aquesta prova s'ha optat per afegir menys càrrega magnètica per intentar que la força que els imants proporcionen no freni el moviment.

10.4.7.1. Resultats Prova 4.7.

Malgrat que s'ha reduït la càrrega magnètica, les proves demostren que el moviment no arriba a fer girs complets i després de cada gir de $90^\circ - 180^\circ$ el gir canvia de sentit. No s'han extret velocitats de gir perquè durant els 30 segons de la prova, la part mòbil no presenta un patró de moviment sinó que va canviant aleatòriament el seu gir.

10.4.8. Prova 4.8.

- La càrrega aplicada en aquesta prova és igual a la de la prova 4.1 i igualment repartida.
- La distància entre la part superior (part mòbil) i la part inferior (part fixa) és de 16 mm.
- La prova es fa amb una freqüència i amplitud predeterminada: $f = 400$ mHz; $A = 580$ mV.
- La configuració dels imants és la de la Figura 10.14:

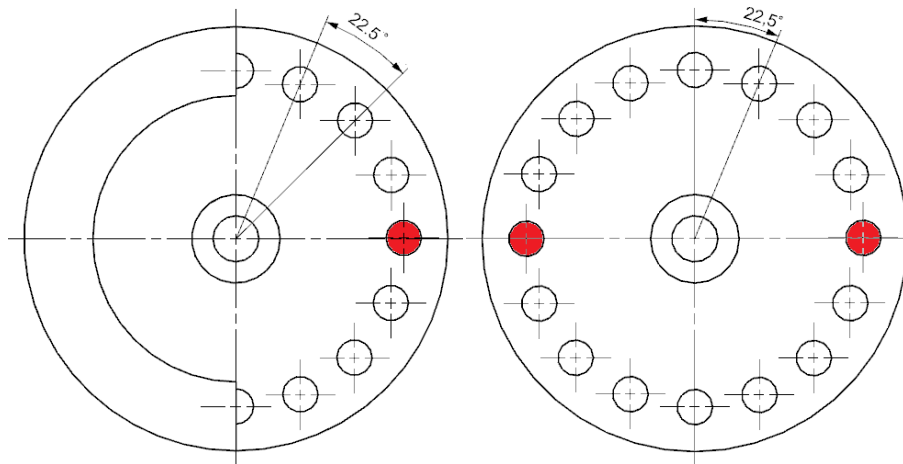


Figura 10.14. Configuració magnètica Prova 4.8. (Esquerra disc superior/Dreta disc inferior)

La part superior (imatge de l'esquerra) està carregada amb un imant situat a 180° del pes.

La part inferior està carregada amb dos imants separats entre ells per 180° i sobre la línia horitzontal.

Els imants de la part superior i inferior estan orientats de manera que es repel·leixen.

10.4.8.1. Resultats Prova 4.8.

El gir amb aquesta configuració dels imants és visiblement pitjor que el de la Prova 4.7. La part mòbil segueix sense fer girs complets (no arriba a efectuar girs de 90°) i els canvis de sentit del moviment són constants.

10.4.9. Prova 4.9.

- La càrrega aplicada en aquesta prova és igual a la de la prova 4.1 i igualment repartida.
- La distància entre la part superior (part mòbil) i la part inferior (part fixa) és de 16 mm.
- La prova es fa amb una freqüència i amplitud predeterminada: $f = 400$ mHz; $A = 580$ mV.
- La configuració dels imants és la següent (Figura 10.15):

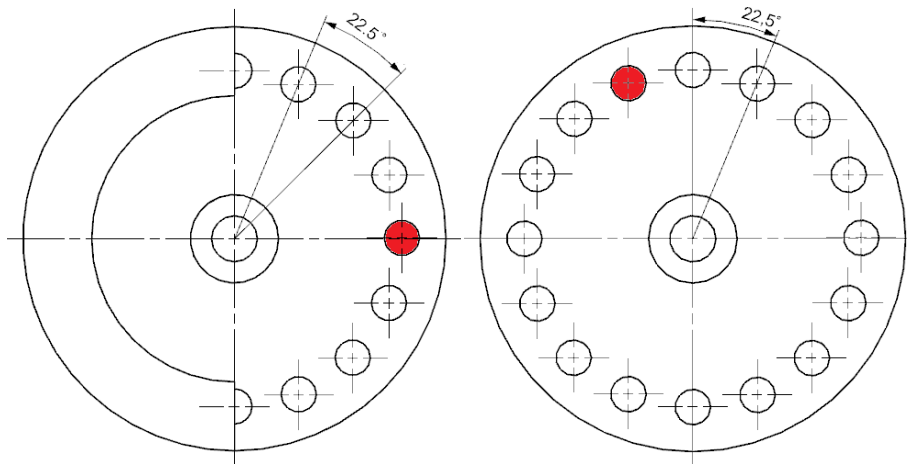


Figura 10.15. Configuració magnètica Prova 4.9. (Esquerra disc superior/Dreta disc inferior)

La part superior (imatge de l'esquerra) està carregada amb un imant situat a 180° del pes.

La part inferior està carregada amb un imant situat a $22,5^\circ$ de la vertical en sentit contrahorari.

Els imants de la part superior i inferior estan orientats de manera que es repel·leixen.

10.4.9.1. Resultats Prova 4.9.

En aquesta prova, la part mòbil fa alguns girs complets encara que no tots en el mateix sentit.

S'ha calculat la velocitat de gir calculant el temps que triga en fer una volta sencera (Taula 10.9):

Taula 10.9. Resultats velocitat Prova 4.9.

Volta	Temps en completar 1 volta (s)	Velocitat n (rps)
1	2,064	0,485
2	2,064	0,485
3	2,064	0,485
4	2,251	0,444

La part mòbil, durant els 30 segons que dura la prova, efectua 4 girs complets a més de diversos girs de poc angle.

Els girs no tots són en el mateix sentit i tampoc es produeixen de manera consecutiva.

S'ha calculat la velocitat de la mateixa manera que en la Prova 4:

$$n = \frac{1 \text{ volta}}{\text{temps en efectuar 1 volta}}$$

Les velocitats en fer els girs complets es són constants, totes $n = 0.485$ rps, menys en el cas del últim gir.

Amb la Taula 10.10 es pot observar comparativa de les altres velocitats:

Taula 10.10. Resultats velocitats (2) Prova 4.9.

Prova	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Velocitat n (rps)	0,371	0,338	--	0,533	--	--	--	--	0,485

Amb la taula comparativa es pot observar que la velocitat de gir obtinguda a la Prova 9 és superior a la de la Prova 4.1 (prova feta sense imants) però no arriba a la velocitat de la Prova 4.4.

10.5. Resultats obtinguts en els tests de gir.

Durant les proves efectuades en els test de gir realitzats en els anteriors apartats de l'experimentació es pot arribar a la conclusió de que per a les característiques del dispositiu construït en aquest Treball de Fi de Grau no hi ha una configuració amb imants vàlida la qual millori el gir del pèndol. Però s'ha pogut observar que el pèndol carregat amb un pes repartit al voltant del perímetre millora les prestacions.

Malgrat no haver trobat una configuració que clarament millori la velocitat o la homogeneïtat del gir del pèndol, sí s'ha trobat una amplitud i una freqüència (paràmetres de la taula de proves) en la qual el gir del dispositiu sense configuració magnètica s'efectua de manera homogènia i en un mateix sentit.

La freqüència és de $f = 400$ mHz i l'amplitud de $A = 400$ mV a $A = 500$ mV.

10.5.1. Simulacions de moviment efectuades amb ORCAFLEX.

Amb els paràmetres de la taula assignats d'una amplitud de 500 mV i un període de 400 mHz (els valors que fan que el dispositiu giri amb major facilitat), s'ha observat que s'obté una inclinació del disc del prototipus de aproximadament 15° (Figura 10.16).

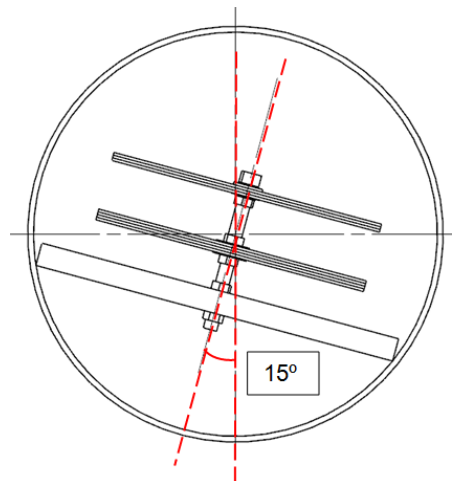


Figura 10.16. Angle d'inclinació del prototipus.

El prototipus construït durant el projecte està dissenyat per anar ubicat en una boia de manera que aquesta transmeti els moviments de l'onatge marí al pèndol del prototipus.

Per simular els moviments que es podrien donar en el pèndol en situar-lo en alta mar, es fa una simulació amb el programa ORCAFLEX, que es tracta d'un programa informàtic per a l'anàlisi dinàmic de sistemes marins en alta mar.

La simulació es farà amb una boia disponible al mercat de l'empresa EMS (Figura 10.17):

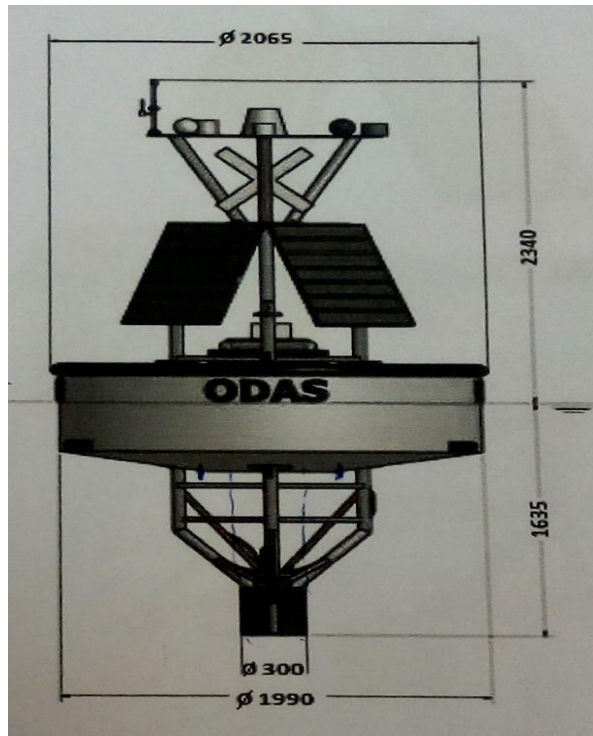


Figura 10.17. Dimensions de la boia que serà simulada (mesures en mm).

Les condicions del mar que seran simulades seran les següents:

Alçada de les onades simulades: $H = 3.5\text{m}$

Període de les onades: $T = 5\text{s}$.

Segons l'escala *Douglas* aquest tipus de mar seria classificada com a mar gruixuda.

Amb les condicions afegides al model d'ORCAFLEX s'estudiarà la inclinació que es produirà en la superfície de la boia per tal de poder extrapolar els resultats obtinguts amb el dispositiu durant els tests de gir amb una boia real situada al mar.

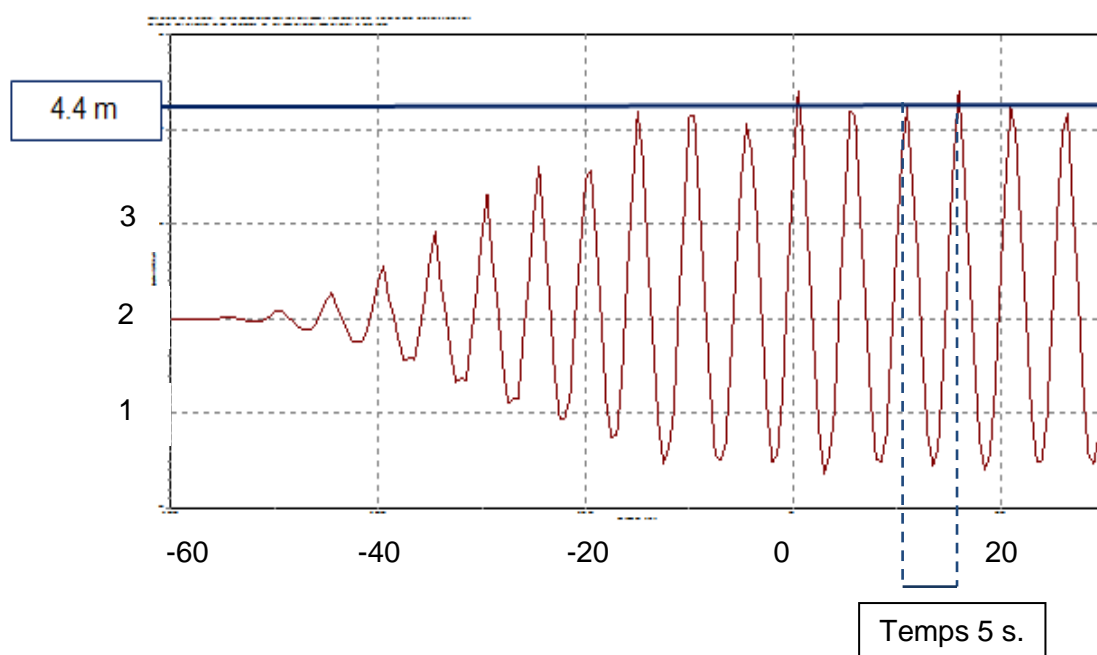
Per poder visualitzar els resultats de la inclinació produïda han sigut agafats dos punts contraposats del model (Figura 10.18) i seran comparades les alçades que seran obtingudes al llarg de la simulació.



Figura 10.18. Simulació efectuada de la boia amb els Punts seleccionats.

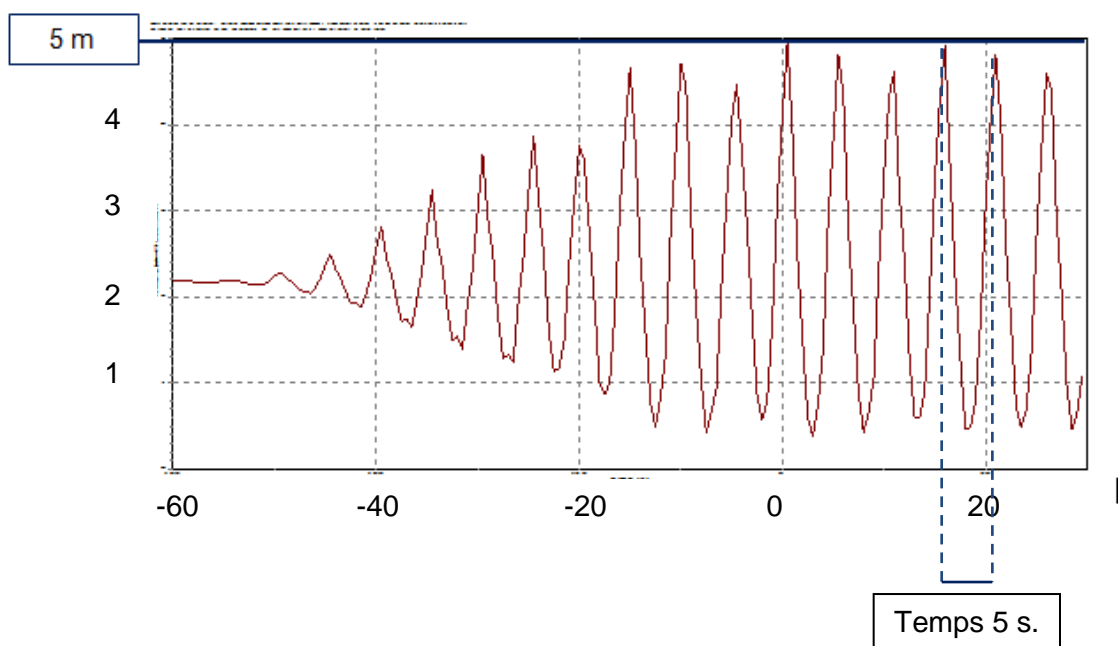
La Gràfica 10.1 mostra l'alçada que s'obté en el punt 1 durant la simulació:

Gràfica 10.1. Alçada punt 1 durant la simulació (ordenades: alçada [m]; abscisses: temps [s]).



La Gràfica 10.2 mostra l'alçada que s'obté en el punt 2 durant la simulació:

Gràfica 10.2. Alçada punt 2 durant la simulació. (ordenades: alçada [m]; abscisses: temps [s]).



En observar el resultats obtinguts en les dues gràfiques, es pot calcular l'angle d'inclinació de la boia per aquestes condicions del mar.

L'angle màxim d'inclinació de la boia és de 17° (Figura 10.19).

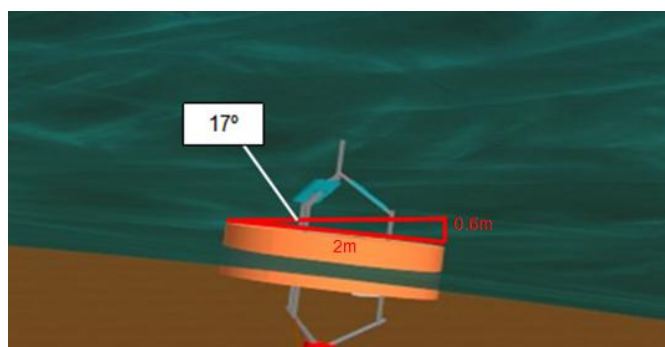


Figura 10.19. Angle inclinació boia simulada.

Si es compara l'angle de 15° obtingut durant l'experimentació amb l'angle obtingut amb la simulació efectuada amb l'ORCAFLEX (angle d'inclinació de 17°) és lleugerament inferior. Encara que a les condicions simulades en la taula de proves és pot afirmar que serien donades en la categoria de mar gruixuda.

11. Experimentació: Tests amb piezoelèctric.

Fins ara les proves realitzades tenien com objectiu tractar de millorar el moviment de gir del prototipus corresponent al projecte realitzat per Jordi Vidal Rubio (*"Disseny, construcció i experimentació d'un prototipus de col·lector d'energia a partir de l'onatge marí piezoelèctrics de vibració"*). L'objectiu era augmentar el nombre d'impactes de les pues del prototipus sobre els piezoelèctrics instal·lats al seu voltant.

Degut als pocs resultats positius obtinguts amb els anteriors tests, s'intentarà aprofitar la força de gir del pèndol i la força magnètica dels imants per fer moure un piezoelèctric i així produir energia.

El piezoelèctric no es deformarà per xoc, si no que serà deformat totalment per la força de repulsió o atracció del imants.

Amb aquest sistema d'excitació del piezoelèctric, respecte a projectes efectuats amb anterioritat (que es produïa la deformació del piezoelèctric per xoc), s'intenta millorar la durabilitat del dispositiu, ja que en deformar-se per la força del imants no es produirà un desgast dels materials tan gran. Un altre aspecte que s'intentarà millorar és que la resistència dels xocs variï la velocitat de gir del pèndol.

El moviment al pèndol serà transmès com anteriorment, amb la taula de proves.

En aquest tests en comptes de buscar l'optimització del gir del prototipus s'intentarà arribar a una configuració on el piezoelèctric produeixi més energia.

11.1. Tipus de piezoelèctric emprat.

El piezoelèctric que s'utilitzarà serà de la companyia *Volture* i el model és el V21B (Figura 11.1).

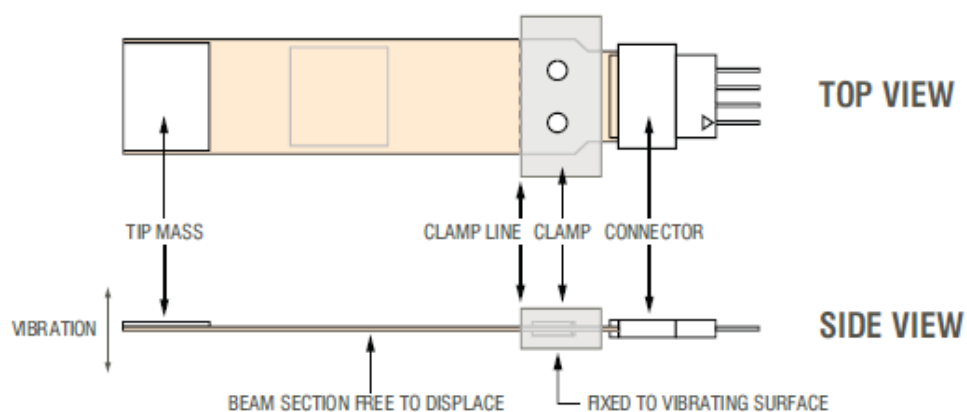
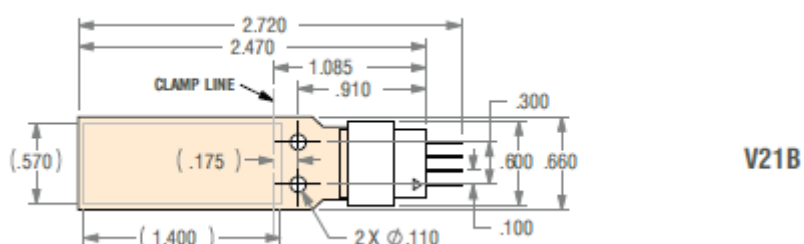


Figura 11.1. Croquis amb les vistes del piezoelèctric utilitzat.

Aquest piezoelèctric compleix totes les característiques per treballar amb el dispositiu de col·lector d'energia desenvolupat, tant es dimensions (Figura 11.2) com en les seves propietats.



DEFLECTION LIMITS

Energy Harvester Product Number	Max. Tip-to-Tip Displacement (in)
V20W	0.10
V25W	0.15
V21B	0.06
V21BL	0.18
V22B	0.03
V22BL	0.12



Figura 11.2. Dimensions del piezoelèctric empleat.

11.1.1. Muntatge del piezoelèctric al prototipus.

El piezoelèctric anirà muntat amb un imant al seu extrem (Figura 11.3). L'imant de l'extrem serà el que proporcionarà el moviment, en reacció amb els imans de la part giratòria, necessari per a que el piezoelèctric produeixi electricitat.

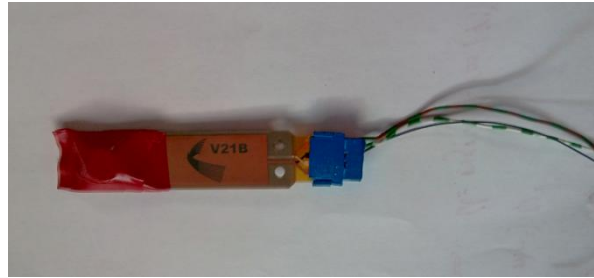


Figura 11.3. Muntatge de l'imant al piezoelèctric.

El piezoelèctric serà muntat a un tac de fusta, i a la vegada aquest tac de fusta anirà acoblat al suport (Figura 11.4).

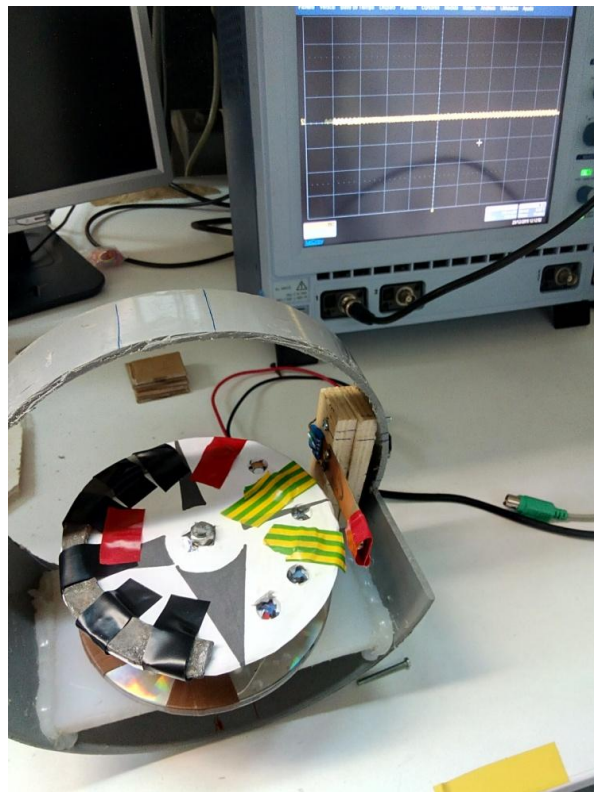


Figura 11.4. Muntatge final amb el piezoelèctric.

L'energia produïda en deformar-se el piezoelèctric gràcies a l'acció dels imants serà recollida amb un oscil·loscopi.

La manera d'endollar el piezoelèctric a l'oscil·loscopi ve descrita per el proveïdor (Figura 11.5).

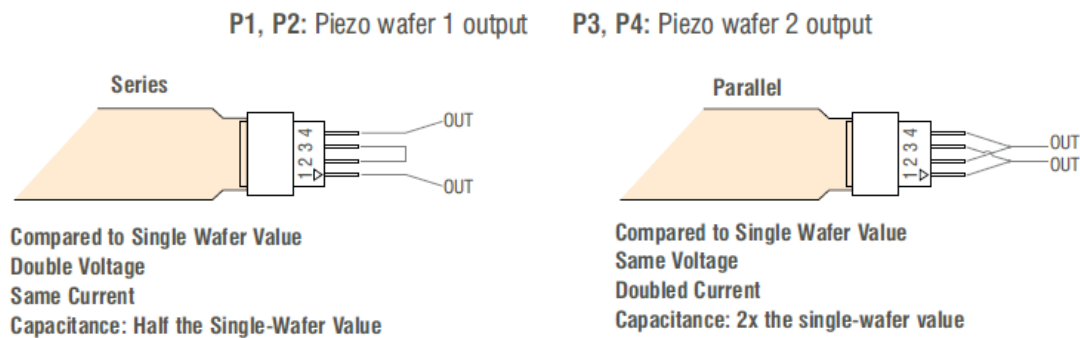


Figura 11.5. Connexions del piezoelèctric.

Primeres proves:

Les primeres proves s'ha efectuat fent girar la part mòbil manualment. Només per comprovar la validesa del muntatge, fer la comprovació de si l'atracció o la repulsió dels imants era lo suficientment gran com per deformar el piezoelèctric i produir energia.

En les primeres proves es pot observar que depenent del sentit dels imants i de la quantitat que hi ha repartits al voltant del perímetre de la part mòbil els resultats són més o menys visibles amb l'oscil·loscopi, però sempre produeix senyal.

11.2. Test amb piezoelèctric 1.

L'execució d'aquest primer test amb la incorporació d'un piezoelèctric al dispositiu, com anteriorment s'ha descrit, s'ha fet a la taula de proves. A diferència dels anteriors tests, on els resultats extrets ha sigut les voltes donades i la velocitat aconseguida a l'hora de girar a una determinada freqüència i amplitud, a les proves elaborades a continuació es llegirà l'energia elèctrica aconseguida en fer passar els imants pel piezoelèctric (també imantat).

El imant situat al piezoelèctric i els imants que s'aniran incorporant a la part mòbil, quan es trobin en la seva trajectòria, ho faran de manera que estaran girats a 90°. El imant situat al piezoelèctric es trobarà vertical i els situats a la part mòbil en horitzontal. La distància entre els imants del piezoelèctric i els situats al disc serà de 2 cm. Figura 11.6.

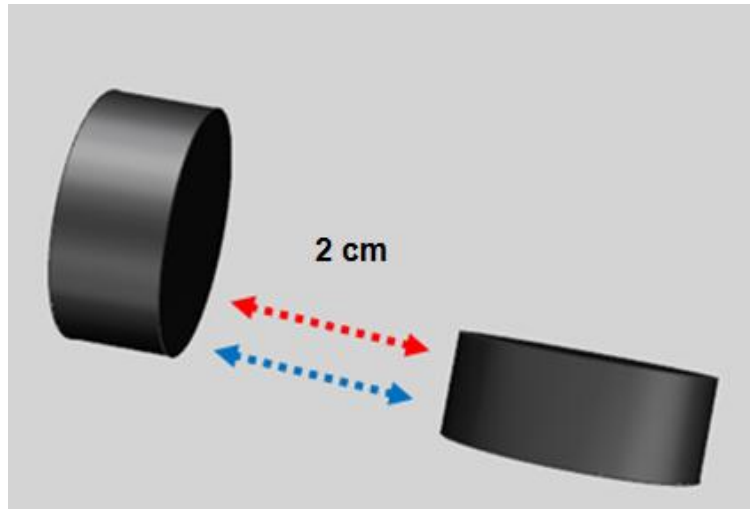


Figura 11.6. Disposició del imants en les proves amb piezoelèctrics.

Com s'ha pogut observar en l'apartat 9. *Caracterització dels imants* la força d'atracció que produeixen dos imants situats a 2 cm un de l'altre és de 0.46 N.

Val a dir que segons la seva orientació (si es repel·leixen o s'atreuen), la força és pràcticament la mateixa.

L'amplitud i la freqüència que serà utilitzades al llarg de tot el test seran les mateixes en totes les proves i seran $A = 500$ mV i $f = 400$ mHz. S'agafaran aquest paràmetres degut a que s'ha observat (en els tests de gir) que el pèndol gira amb més facilitat que amb altres valors.

11.2.1. Prova 2.1.

El dispositiu té la següent configuració:

- La distribució de pes és igual a la incorporada en els Tests de gir 3. Una càrrega aproximada de 0,14 kg formant pràcticament un angle de 180° i no uniformement repartida.
- A la part fixa del prototipus no li serà incorporada cap configuració magnètica.
- La part mòbil és carregada amb un imant de manera que s'atreu amb el imant incorporat al piezoelèctric. El imant serà col·locat a 180° del centre de la massa de la part mòbil, com es mostra a la Figura 11.7:

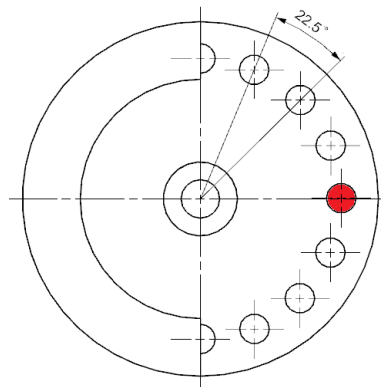
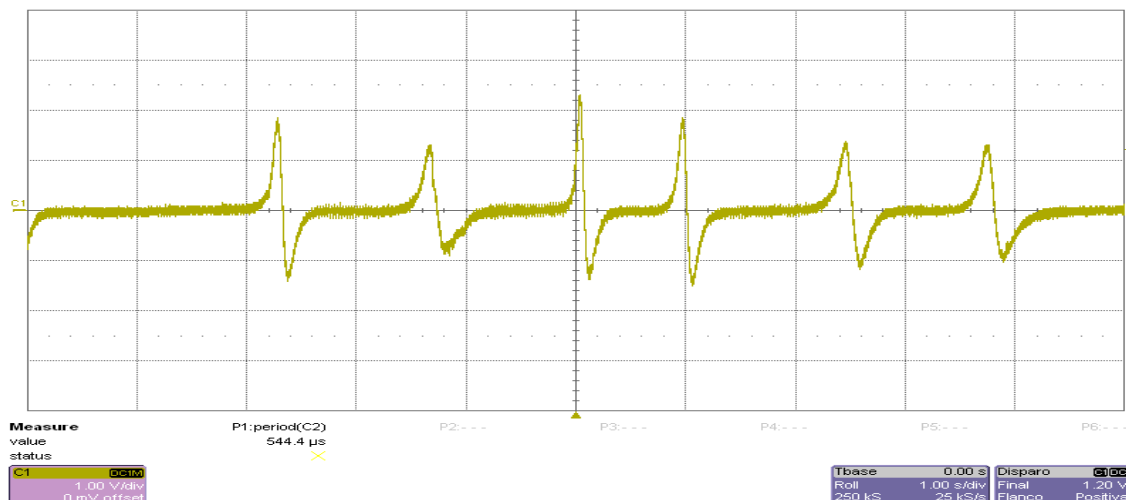


Figura 11.7. Configuració magnètica Prova 2.1.

Els resultats obtinguts en la Prova 2.1 es poden observar en la forma d'ona d'escripta per l'oscil·loscopi (Gràfica 11.1):

Gràfica 11.1. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi Prova 2.1.



Durant el transcurs de la prova s'ha pogut observar que el gir de la part mòbil s'efectuava sense dificultats malgrat la força d'atracció del imant incorporat.

De la gràfica aconseguida amb l'oscil·loscopi es pot extreure que s'aconsegueix un pic màxim de aproximadament 2,5 V.

Càlcul valor eficaç del Voltatge (V_{rms}) per una excitació:

Per calcular el valor eficaç del voltatge es farà servir la següent fórmula:

$$V_{rms} = V_{pic} * \frac{1}{\sqrt{2}} \quad [1]$$

On,

V_{rms} : valor eficaç del voltatge [V]

V_{pic} : pic de voltatge [V]

La fórmula [1] serà aplicada per a cada pic que es produeixi durant una excitació del piezoelèctric.

Càlcul Potència total aconseguida duran una excitació:

$$P = \frac{\text{número de pics} * V_{rms}^2}{R} \quad [2]$$

On,

R= 1 MOhm.

P: Potència [W]

Igual que per efectuar el càlcul del voltatge eficaç, la fórmula [2] serà aplicada per a cada pic. El valor de P_{TOTAL} serà la suma de tots.

$$P_{TOTAL} = P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad [3]$$

Càlcul energia (E) aconseguida durant una excitació:

$$E = P * \text{temps} \quad [4]$$

On,

E: energia per una excitació [J]

Els resultats obtinguts en efectuar el càlculs es mostren a continuació:

1r pic; V_{rms} = 1.273 V (en 300 ms)

2n pic; V_{rms} = 1 V (en 300 ms)

1r pic; P_1 = 0.0016 mW.

2n pic; P_2 = 0.001 mW.

Taula 11.1. Resultats Prova 2.1.

Resultats Prova 2.1.	
Temps d'una excitació (s)	0.6
P_{total} (mW)	$2.6 \cdot 10^{-3}$
E (mJ)	0.0016

L'energia calculada a la Taula 11.1. es refereix a l'energia capturada per a cada excitació.

La gràfica mostra una excitació del piezoelèctric cada segon aproximadament; per tant, fent una aproximació, l'energia capturada per minut seria la següent:

$$E = 60 \text{ excitacions per minut} \cdot 0.0016 \text{ mJ} = 0.096 \text{ mJ}$$

11.2.2. Prova 2.2.

La configuració del dispositiu és la mateixa que la de la Prova 2.1, només es varia la configuració dels imants de la part mòbil.

En aquest cas el imant incorporat a la part mòbil estarà orientat de manera que es repel·leix amb el imant del piezoelèctric (representat en blau). Figura 11.8:

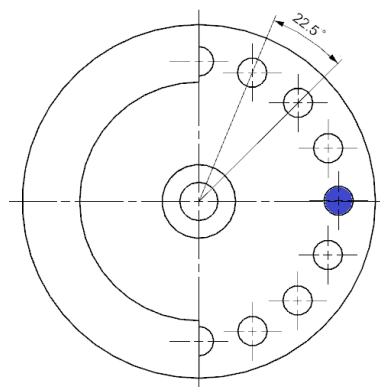
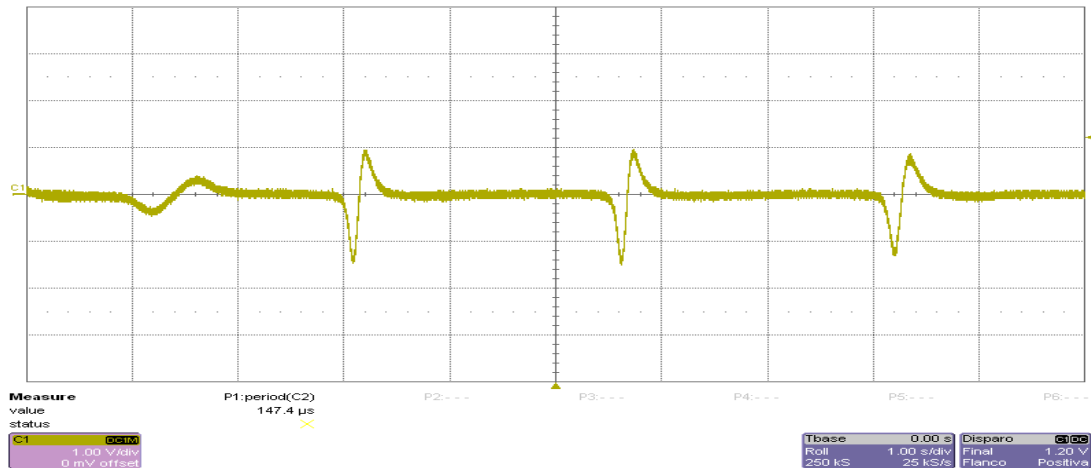


Figura 11.8. Configuració magnètica Prova 2.2.

Els resultats enregistrats per l'oscil·loscopi mostren la gràfica següent (Gràfica 11.2):

Gràfica 11.2. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 2.2.



La capacitat de gir d'aquesta prova tampoc es veu perjudicada per la incorporació de l'imant que en aquest cas repel·leix a l'imant situat al piezoelèctric.

El resultat de la gràfica dona uns pics de valors que es van repetint amb un cert període i de manera homogènia. Els pics més alts tenen un valor aproximat de 1 V.

Respecte a la Prova 2.1., es pot extreure que els pics es repeteixen amb intervals de temps més elevats, per tant el disc gira amb menor velocitat, i els pics són inferiors als aconseguits a la Prova 2.1.

1r pic; $V_{rms} = 1 \text{ V}$ (en 200 ms)

2n pic; $V_{rms} = 0.70 \text{ V}$ (en 200 ms)

1r pic; $P_1 = 0.001 \text{ mW}$.

2n pic; $P_2 = 0.0005 \text{ mW}$.

Taula 11.2. Resultats Prova 2.2.

Resultats Prova 2.2.	
Temps d'una excitació (s)	0.4
P_{total} (mW)	0.0015
E (mJ)	0.0006

Les excitacions del piezoelèctric es produeixen aproximadament cada 2 segons.

L'energia capturada per minut és la següent:

$$E = 30 \text{ excitacions per minut} * 0.0006 \text{ mJ} = 0.018 \text{ mJ}$$

11.2.3. Prova 2.3.

La configuració del dispositiu no canvia i només varia la configuració magnètica de la part mòbil de la manera següent: Són incorporats a la part mòbil tres imants consecutius orientats de manera que s'atreuen amb el imant del piezoelèctric de la manera que es mostra a la Figura 11.9:

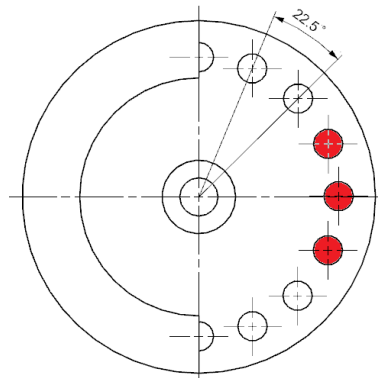
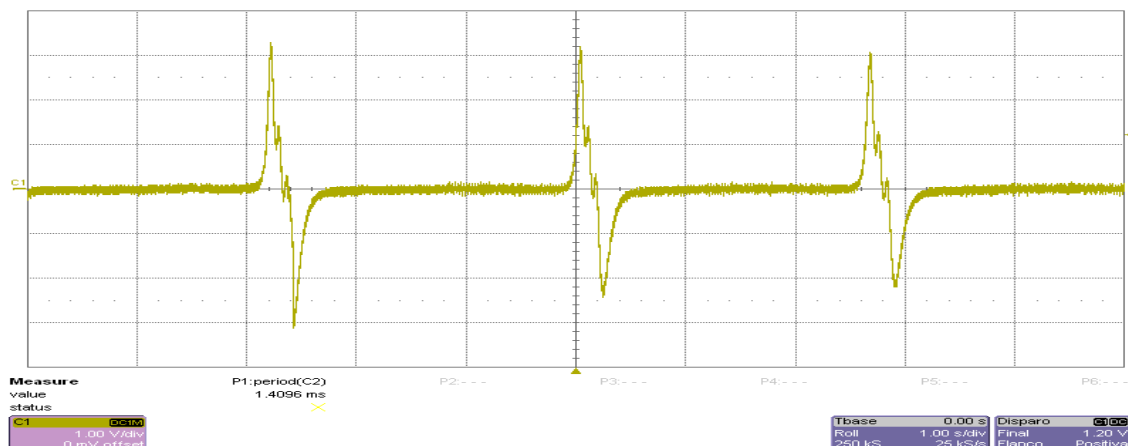


Figura 11.9. Configuració magnètica Prova 2.3.

Els resultats obtinguts són els següents (Gràfica 11.3):

Gràfica 11.3. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 2.3.



Amb la gràfica obtinguda en aquesta prova es pot extreure que els pics del voltatge obtingut són més grans que els obtinguts en les anteriors dues proves, arriba a un voltatge de 3 V, encara que el seu període no és elevat.

1r pic; V_{rms} = 2.3 V (en 150 ms)

2n pic; V_{rms} = 2.3 V (en 150 ms)

1r pic; $P_1 = 0.005 \text{ mW}$.

2n pic; $P_2 = 0.005 \text{ mW}$.

Taula 11.3. Resultats Prova 2.3.

Resultats Prova 2.3.	
Temps d'una excitació (s)	0.3
P_{total} (mW)	0.01
E (mJ)	0.003

Es produeix una excitació del piezoelèctric cada 2,5 segons i l'energia capturada per minut és de:

$$E = 24 \text{ excitacions per minut} * 0.003 \text{ mJ} = 0.072 \text{ mJ}$$

11.2.4. Prova 2.4.

La configuració del dispositiu és idèntica a les anteriors proves i es modifica la configuració dels imants: La part mòbil és configura de la mateixa manera que en la prova 2.3, però amb el imants situats amb signe contrari, és a dir, de manera que es repel·leixen amb el piezoelèctric. La configuració es mostra a la figura següent (Figura 11.10):

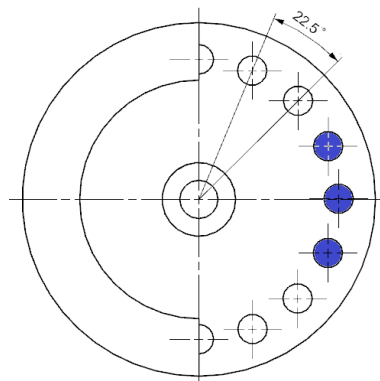
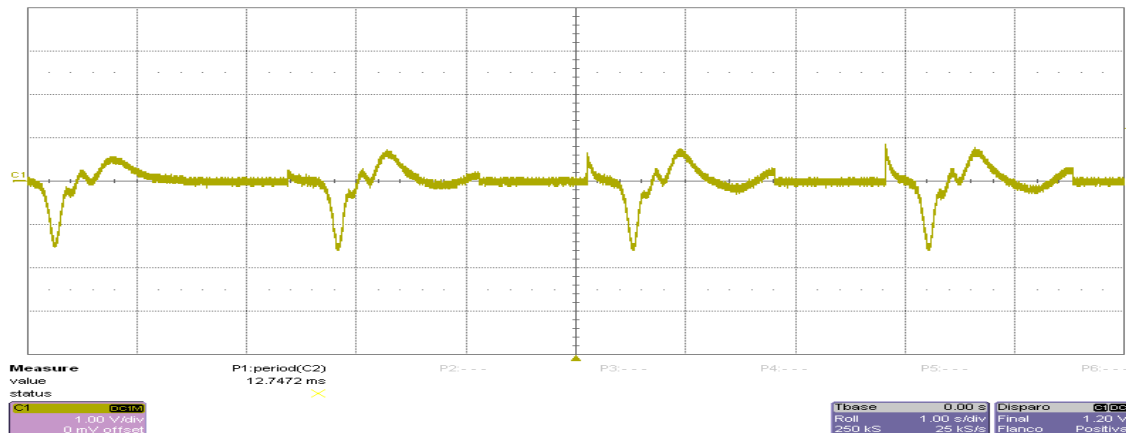


Figura 11.10. Configuració magnètica Prova 2.4.

Els resultats que mostra l'oscil·loscopi per aquesta configuració són els següents (Gràfica 11.4):

Gràfica 11.4. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 2.4.



La gràfica obtinguda amb l'oscil·loscopi en aquesta prova mostra que els pics de l'amplitud són inferiors als obtinguts en la Prova 2.3, arribant fins a uns pics màxims de 1,5 V, mentre que en l'anterior prova s'havien obtingut uns pics de fins a 3 V. Encara que en aquesta prova millora el període en que el piezoelèctric s'excita i produeix energia.

Com havia passat en la comparació entre les proves 1 i 2, la configuració que té els imants orientats de manera que s'atreuen amb l' imant del piezoelèctric produeixen un voltatge més alt.

Els càlcul de potència i d'energia no han sigut efectuats degut al baix rendiment d'aquesta configuració.

11.2.5. Prova 2.5.

La configuració de la part fixa es manté com en les anteriors proves i a la part mòbil s'efectua la següent modificació de la configuració magnètica. La part mòbil es carrega a 5 imants consecutius de manera que s'atreuen amb l'imant del piezoelèctric (Figura 11.11):

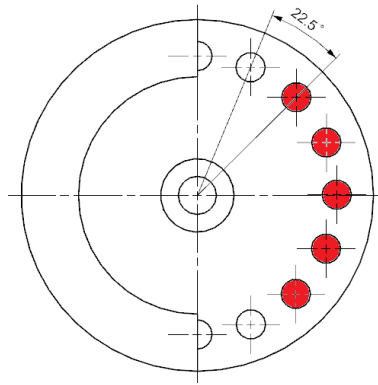
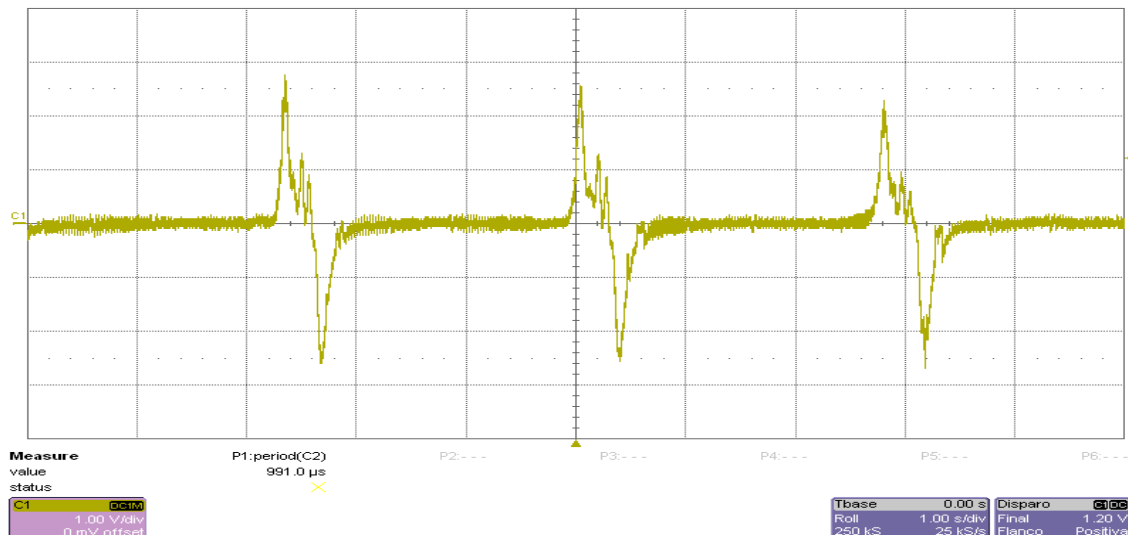


Figura 11.11. Configuració magnètica Prova 2.5.

La gràfica obtinguda amb l'oscil·loscopi es mostra a continuació (Gràfica 2.5):

Gràfica 11.5. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 2.5.



En aquesta prova que s'han afegit 2 imants més, un total de 5, respecte a les proves 2.3. i 2.4, el piezoelèctric es deforma durant més temps (fins que passen els 5 imants) però els pics de voltatge aconseguits, de 2,5 V, no són més elevats que els aconseguits en la Prova 2.3 que eren de 3 V.

També s'ha pogut observar duran el transcurs de la prova que al disc li costava més que en les anteriors proves efectuar el girs. La seva velocitat disminueix considerablement i inclòs i va haver moments que el mecanisme va quedar estàtic degut a que la part del disc carregada amb els imants quedava aturada on estava situat el piezoelèctric.

1r pic; $V_{rms} = 1.8 \text{ V}$ (en 200 ms)

2n pic; $V_{rms} = 1.8 \text{ V}$ (en 200 ms)

1r pic; $P_1 = 0.003 \text{ mW}$.

2n pic; $P_2 = 0.003 \text{ mW}$.

Taula 11.4. Resultats Prova 2.5.

Resultats Prova 2.5	
Temps d'una excitació (s)	0.4
P_{total} (mW)	0.006
E (mJ)	0.0025

Les excitacions del piezoelèctric es produeixen cada 2 segons.

L'energia capturada per minut:

$$E = 30 \text{ excitacions per minut} * 0.0025 \text{ mJ} = 0.075 \text{ mJ}$$

11.2.6. Prova 2.6.

La configuració de la part fixa és manté igual respecte les anterior proves. La configuració de la part mòbil varia respecte la Prova 5 en la orientació dels imants. Ara els 5 imants consecutius estan orientats de manera que es repel·leixen amb el piezoelèctric (Figura 11.12):

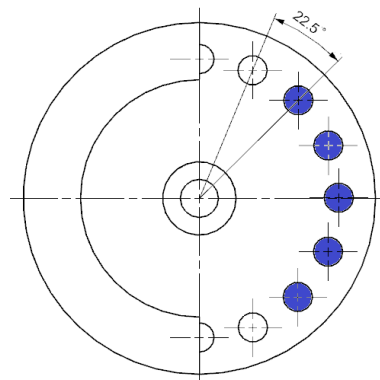
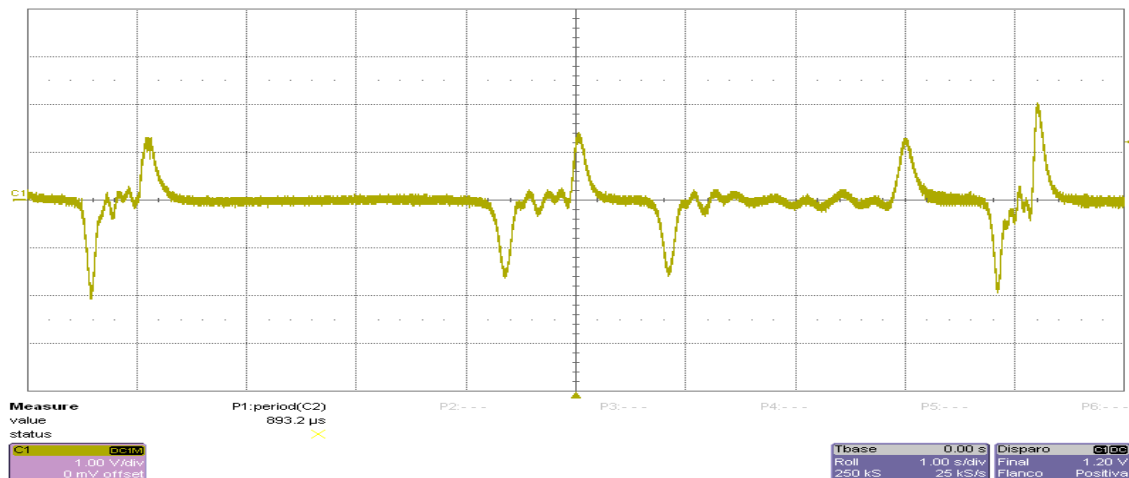


Figura 11.12. Configuració magnètica Prova 2.6.

Els resultats obtinguts són els següents (Gràfica 11.6):

Gràfica 11.6. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 2.6.



Els resultats obtinguts amb els imants orientats de manera que es repel·leixen amb l'imant situat al piezoelèctric mostren, com ha passat en les anteriors proves efectuades, que per a una mateixa configuració dels imants els pics més alts d'amplitud es troben quan els imants estan situats de manera que s'atreuen amb l'imant del piezoelèctric.

Els càlculs de potència i energia no s'han efectuat degut a la irregularitat de la gràfica aconseguida.

11.2.7. Prova 2.7.

La configuració es manté igual que a les altres proves i varia la configuració del imants de la part mòbil: Se situa un imant a 180° del centre del pes orientat de manera que es repel·leix amb el imant situat al piezoelèctric. Als dos costats de l'imant se situen dos més amb signe contrari de manera que s'atreuen amb el piezoelèctric (Figura 11.3):

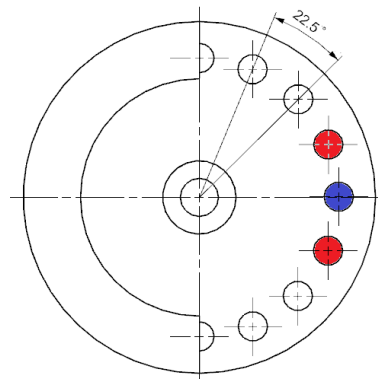
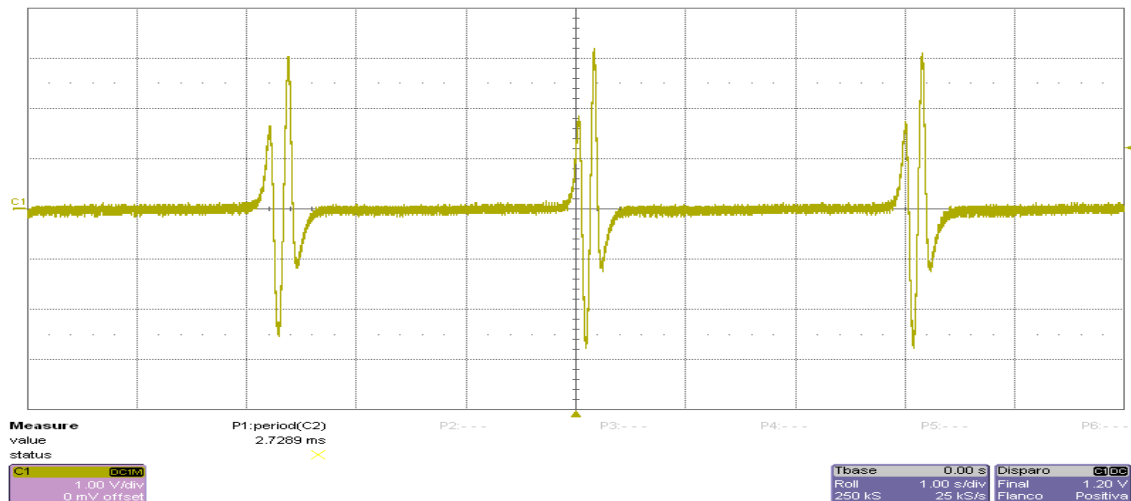


Figura 11.13. Configuració magnètica Prova 2.7.

Els resultats obtinguts descriuen la següent gràfica (Gràfica 11.7):

Gràfica 11.7. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 2.7.



La gràfica obtinguda en la realització de la Prova 2.7 mostra una forma de la ona aconseguida gairebé igual que la aconseguida en la realització de la Prova 2.3. És repeteixen els pics amb la mateixa freqüència i arriben a una amplitud de 3 V.

1r i 4t pic; $V_{rms} = 1.3 \text{ V}$ (en 100 ms) per a cada pic

2n i 3r pic; $V_{rms} = 2.1 \text{ V}$ (en 100 ms) per a cada pic

1r i 4t pic; $P_1 = 0.003 \text{ mW}$.

2n i 3r pic; $P_2 = 0.008 \text{ mW}$.

Taula 11.5. Resultats Prova 2.7

Resultats Prova 2.7.	
Temps d'una excitació (s)	0.4
P_{total} (mW)	0.012
E (mJ)	0.005

Les excitacions es produeixen cada 2 segons. L'energia capturada per minut és de:

$$E = 30 \text{ excitacions per minut} * 0.005 \text{ mJ} = 0.15 \text{ mJ}$$

11.2.8. Prova 2.8.

La configuració és manté constant i la configuració de la part mòbil és la següent: Se situa un imant a 180° del centre del pes orientat de manera que s'atreu amb l'imant situat al piezoelèctric. Als dos costats de l'imant se situen dos més amb signe contrari de manera que es repel·leixen amb el piezoelèctric, La configuració es fa a la inversa de la de la Prova 2.7 (Figura 11.4) :

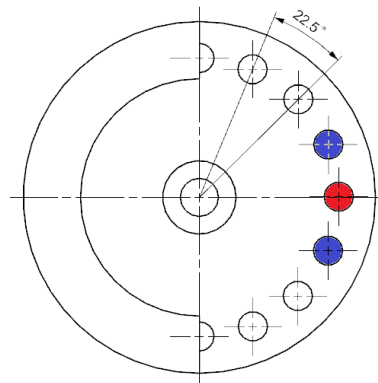
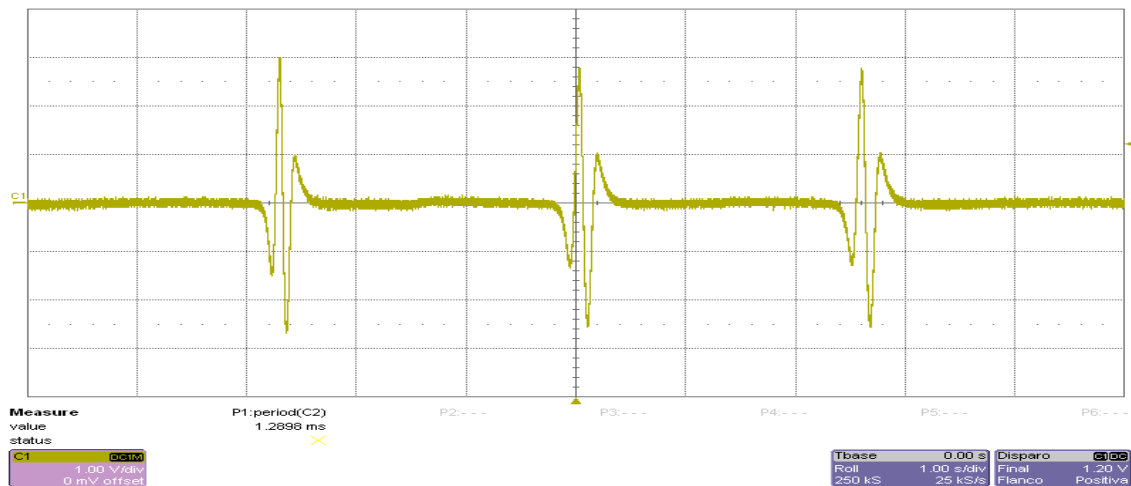


Figura 11.14. Configuració magnètica Prova 2.8.

Els resultats obtinguts són els següents (Gràfica 11.8):

Gràfica 11.8. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 2.8.



Les dades que mostren la gràfica són molt semblants a les efectuades a l'anterior prova, i, per tant, a la Prova 2.3.

1r pic; $V_{rms} = 1.13 \text{ V}$ (en 100 ms)

2n i 3r pic; $V_{rms} = 1.77 \text{ V}$ (en 50 ms) per a cada pic

4t pic; $V_{rms} = 0.71 \text{ V}$ (en 100 ms)

1r pic; $P_1 = 0.0013 \text{ mW}$.

2n i 3r pic; $P_{2,3} = 0.0062 \text{ mW}$.

4t pic; $P_4 = 0.0005 \text{ mW}$.

Taula 11.6. Resultats Prova 2.8.

Resultats Prova 2.8.	
Temps d'una excitació (s)	0.3
$P_{total} \text{ (mW)}$	0.008
$E \text{ (mJ)}$	0.0024

Les excitacions del piezoelèctric es produeixen cada 2 segons. L'energia capturada per minut és:

$$E = 30 \text{ excitacions per minut} * 0.0024 \text{ mJ} = 0.072 \text{ mJ}$$

11.2.9. Prova 2.9.

La configuració de la part fixa és la mateixa que en les anteriors proves. La configuració magnètica de la part mòbil és la següent: Es situen 5 imants consecutius de manera intercalada, és a dir, un imant repel·leix (color blau), el següent imant atreu (color vermell), com mostra la Figura 11.15:

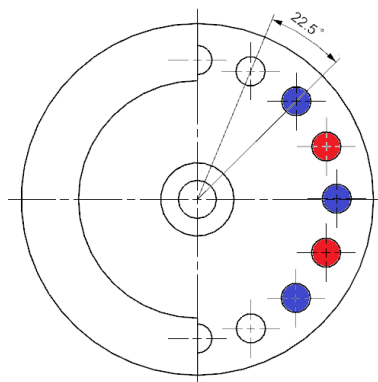
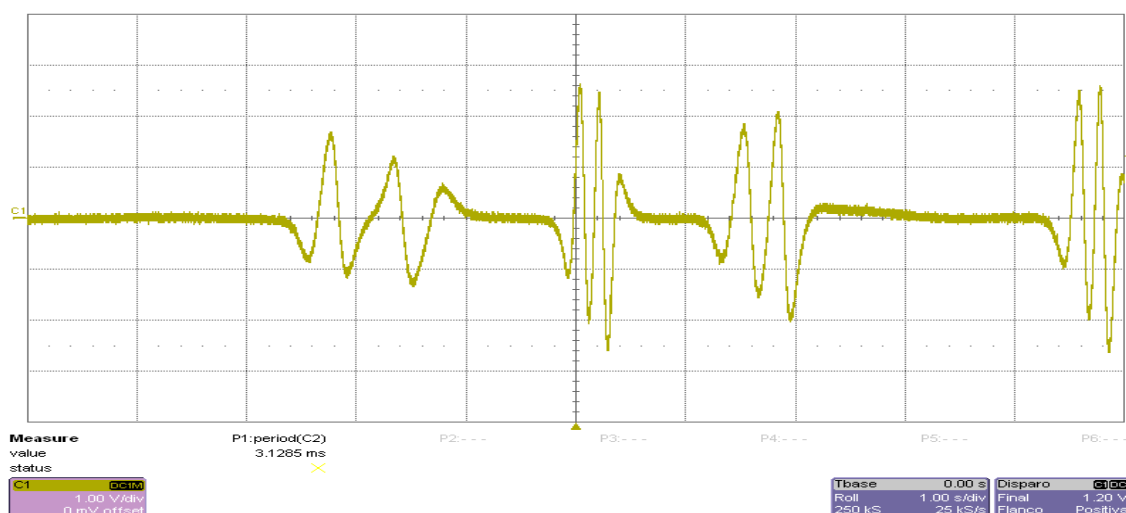


Figura 11.15. Configuració magnètica Prova 2.9.

Els resultats obtinguts són els següents:

Gràfica 11.9. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 2.9.



En aquesta prova no s'han pogut efectuar els càlculs degut a la seva irregularitat.

11.2.10. Prova 2.10.

La part fixa és manté igual a les anteriors proves. La part mòbil és configurada magnèticament de la següent manera: Es col·loquen tres imants consecutius orientats de manera que s'atreuen amb el imant del piezoelèctric, però amb la modificació respecte a proves efectuades anteriorment, de deixar un espai entre els imants:

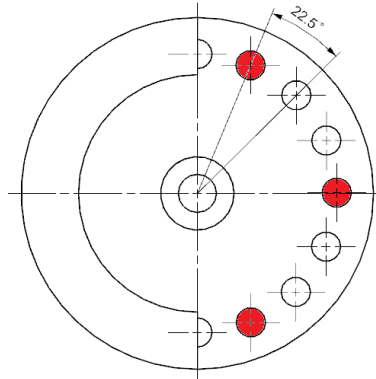
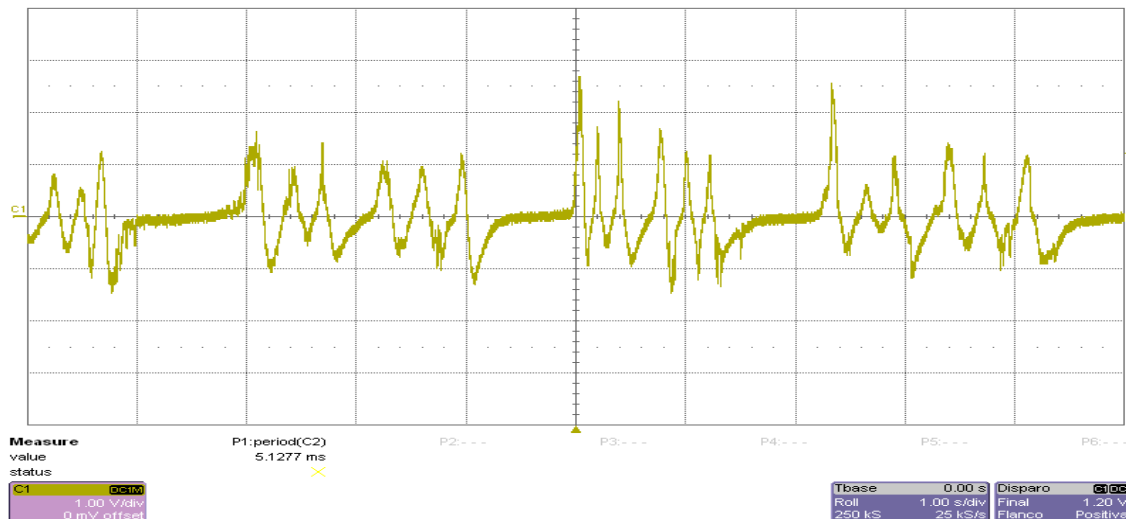


Figura 11.16. Configuració magnètica Prova 2.10.

Els resultats obtinguts són els següents (Gràfica 11.10):

Gràfica 11.10. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 2.10.



La gràfica obtinguda en la realització de la Prova 2.10 es mostra molt diferent de les aconseguides en l'elaboració de les anteriors proves. El repartiment dels imants deixant espais més gran entre ells fan que el piezoelèctric estigui excitant-se durant un període més gran de temps (el que trigen en passar els imants). Els pics d'amplitud mitjans aconseguits són de 1,5 V i es produeixen amb molta freqüència.

La irregularitat de la gràfica obtinguda no possibilita fer el càlcul de l'energia capturada per minut.

11.2.11. Prova 2.11.

La part fixa del prototipus es manté igual a les anterior proves i la part mòbil es configura de la següent manera: Els imants es situen de la mateixa manera que en la Prova 2.10, però en aquest cas amb orientació contrària de manera que es repel·leixen amb l'imant del piezoelèctric (Figura 11.17):

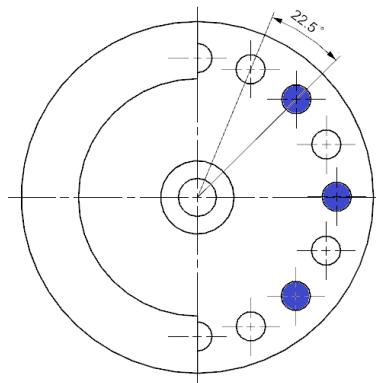
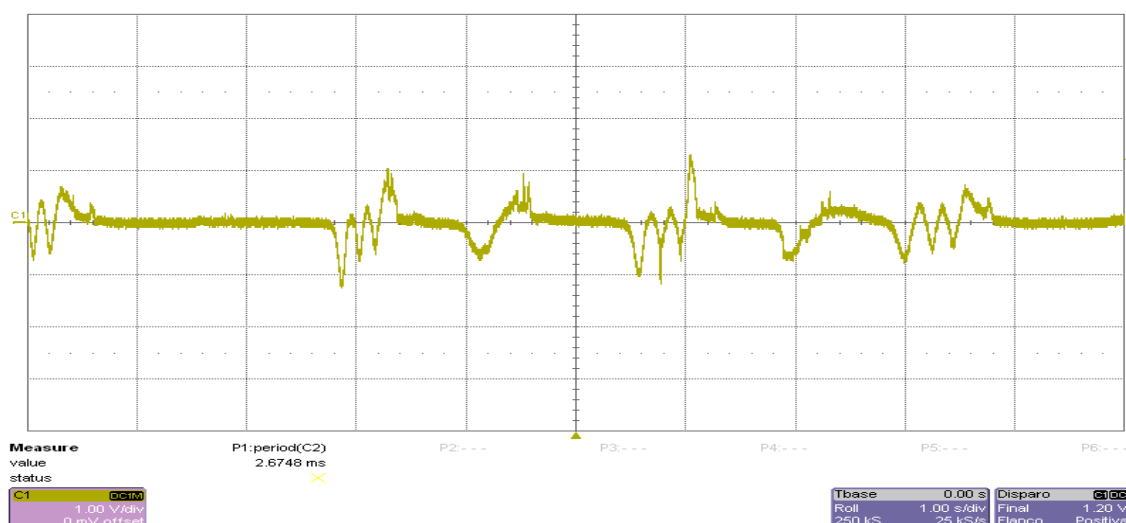


Figura 11.17. Configuració magnètica Prova 2.11.

Els resultats obtinguts són els següents (Gràfica 11.11):

Gràfica 11.11. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 2.11.



La part mòbil del dispositiu no gira homogèniament, ni en un mateix sentit ni a la mateixa velocitat.

Quan gira seguint un mateix sentit, el piezoelèctric es manté excitat durant períodes més llargs, igual que a l'anterior prova, però el fet de tenir el imants orientats de manera que es repel·leixen amb el piezoelèctric fa que els pics de voltatge aconseguits siguin molt petits, els màxims gairebé no superen 1 V.

11.2.12. Prova 2.12.

La part fixa del dispositiu es manté igual a les anterior proves i la part mòbil es configura de la manera següent: Dos imants amb la mateixa orientació, s'atreuen amb el piezoelèctric (vermells) situats a un extrem de la massa del prototipus; dos imants més de igual orientació, es repel·leixen del piezoelèctric (blaus) situats també a l'altre extrem de la massa (Figura 11.18):

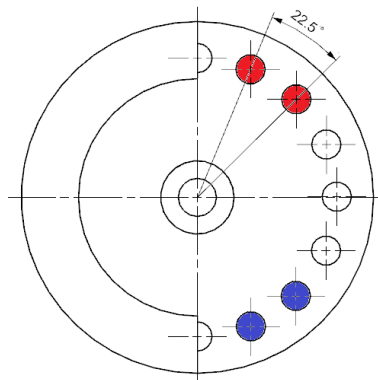
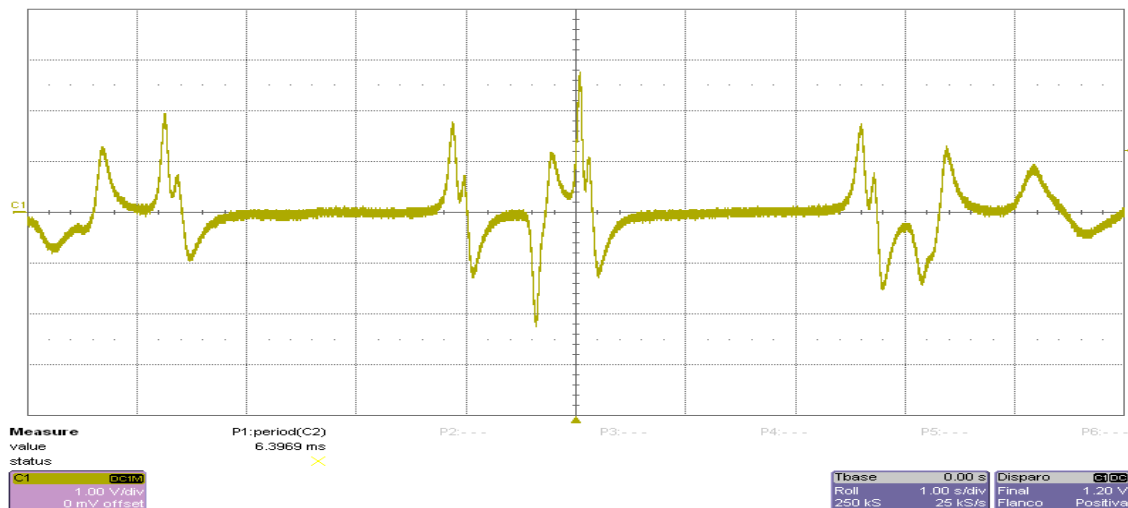


Figura 11.18. Configuració magnètica Prova 2.12.

Els resultats obtinguts són els següents (Gràfica 11.2):

Gràfica 11.12. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 2.12.



La gràfica mostra pics de voltatge molt irregulars durant el temps capturat a l'imatge i durant el transcurs de la prova s'han pogut observar dificultats per efectuar girs homogenis, complets i amb una certa velocitat.

Igual que en les darreres proves efectuades aquesta irregularitat del gir impossibilita extreure els resultats d'energia capturada per minut.

11.2.13. Prova 2.13.

La configuració de la part fixa es manté igual que al llarg de totes les proves. La part mòbil és configurada de la següent manera: Dos imants a cada banda a $22,5^\circ$ respecte de la línia horitzontal de sentit igual i de manera que s'atreuen amb l'imant del piezoelèctric:

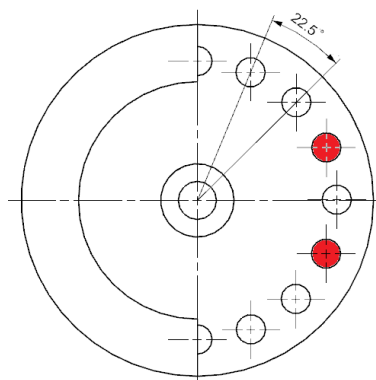
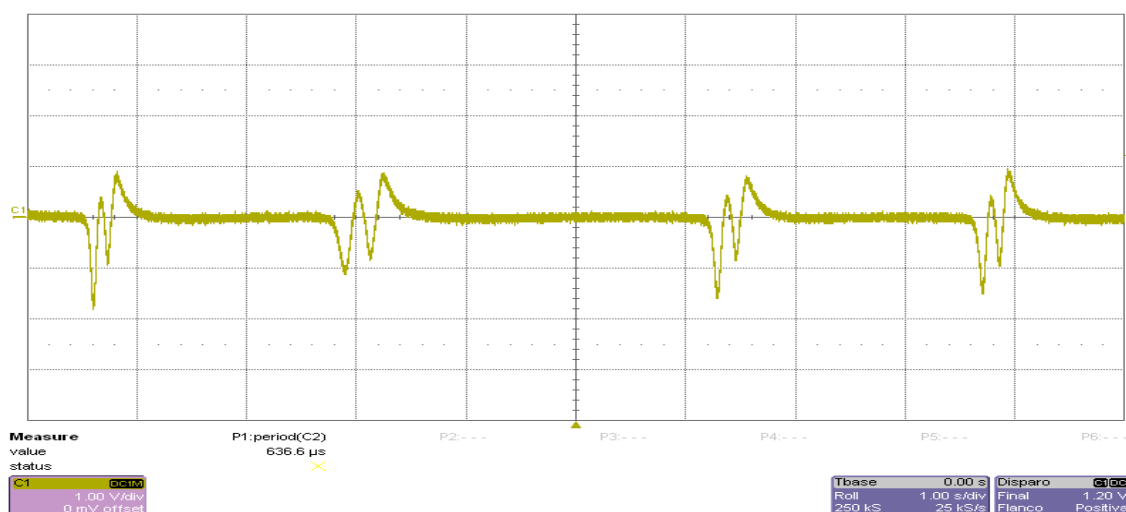


Figura 11.19. Configuració magnètica Prova 2.13.

Els resultats obtinguts són els següents (Gràfica 11.13):

Gràfica 11.13. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 2.13.



El voltatge màxim aconseguit en aquesta prova és baix, els pics són de 1,5 V. Els resultats obtinguts són semblats als obtinguts a la Prova 2.2.

1r pic; $V_{rms}=1.06$ V (en 100 ms)

2n pic; $V_{rms}= 0.28$ V (en 100 ms)

3r pic; $V_{rms}= 0.57$ V (en 100 ms)

1r pic; $P_1= 0.001$ mW.

2n pic; $P_2= 8 \cdot 10^{-5}$ mW.

3r pic; $P_3= 0.0003$ mW.

taula 11.7. Resultats Prova 2.13.

Resultats Prova 2.13.	
Temps d'una excitació (s)	0.3
P_{total} (mW)	0.0015
E (mJ)	0.00046

Les excitacions del piezoelèctric es produeixen cada 2.5 segons. L'energia capturada per minut és:

$$E = 24 \text{ excitacions per minut} * 0.00046 \text{ mJ} = 0.011 \text{ mJ}$$

11.2.14. Prova 2.14.

Configuració de la part fixa igual que a les anteriors proves. La part mòbil està configurada de la següent manera: Els imants es situen igual que a la Prova 5.3.13, però en aquest cas invertint el sentit. Els dos imants repel·leixen l'imant situat al piezoelèctric (Figura 11.20):

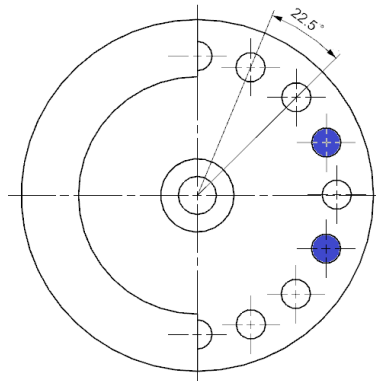
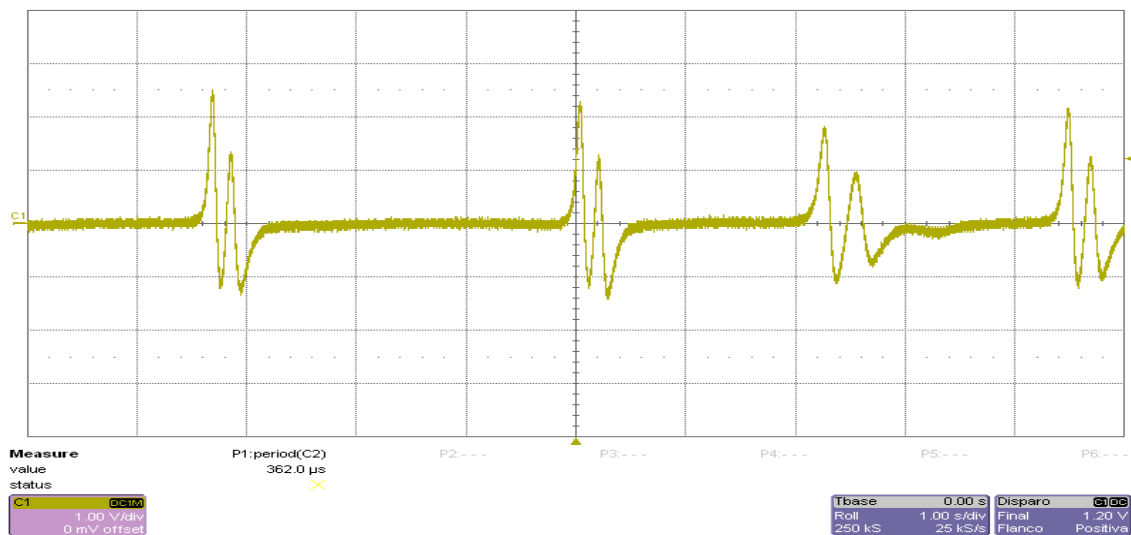


Figura 11.20. Configuració magnètica Prova 2.14.

Els resultats obtinguts són els següents:

Gràfica 11.14. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 2.14.



Els resultats obtinguts en canviar els imants d'orientació, ara es repel·leixen, són millors que els obtinguts en la prova anterior. Els pics de voltatge màxim estan al voltant de 2,5 V.

1r pic; $V_{rms} = 1.77$ V (en 100 ms)

2n i 4t pic; $V_{rms} = 0.85$ V (en 100 ms) per a cada pic

3r pic; $V_{rms} = 0.85 \text{ V}$ (en 100 ms)

1r pic; $P_1 = 0.0031 \text{ mW}$.

2n i 4t pic; $P_{2,4} = 0.0014 \text{ mW}$.

3r pic; $P_3 = 0.00072 \text{ mW}$.

Taula 11.8. Resultats Prova 2.14.

Resultats Prova 2.14.	
Temps d'una excitació (s)	0.4
$P_{total} \text{ (mW)}$	0.0053
$E \text{ (mJ)}$	0.0021

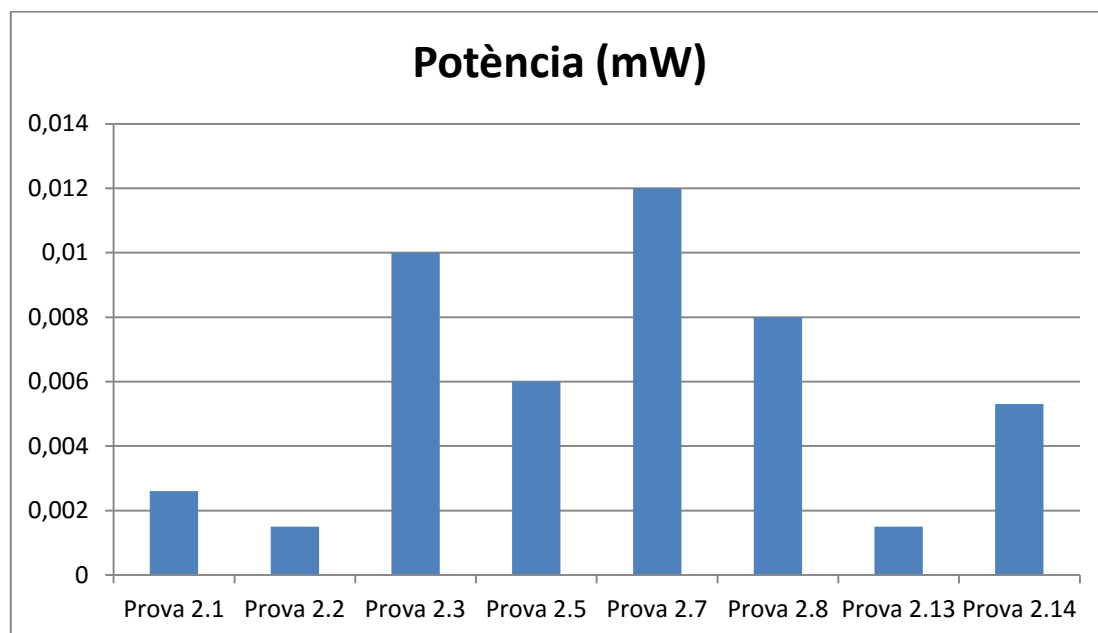
Les excitacions del piezoelèctric es produeixen cada 3 segons. L'energia capturada per minut és:

$$E = 20 \text{ excitacions per minut} * 0.0021 \text{ mJ} = 0.042 \text{ mJ}$$

11.3. Resultats test amb piezoelèctric 1.

La comparació de les potències calculades durant l'apartat 10.5.3. *Test amb piezoelèctric 1* es mostren en la Gràfica 11.15:

Gràfica 11.15. Comparativa de potències obtingudes en el test amb piezoelèctric 1.

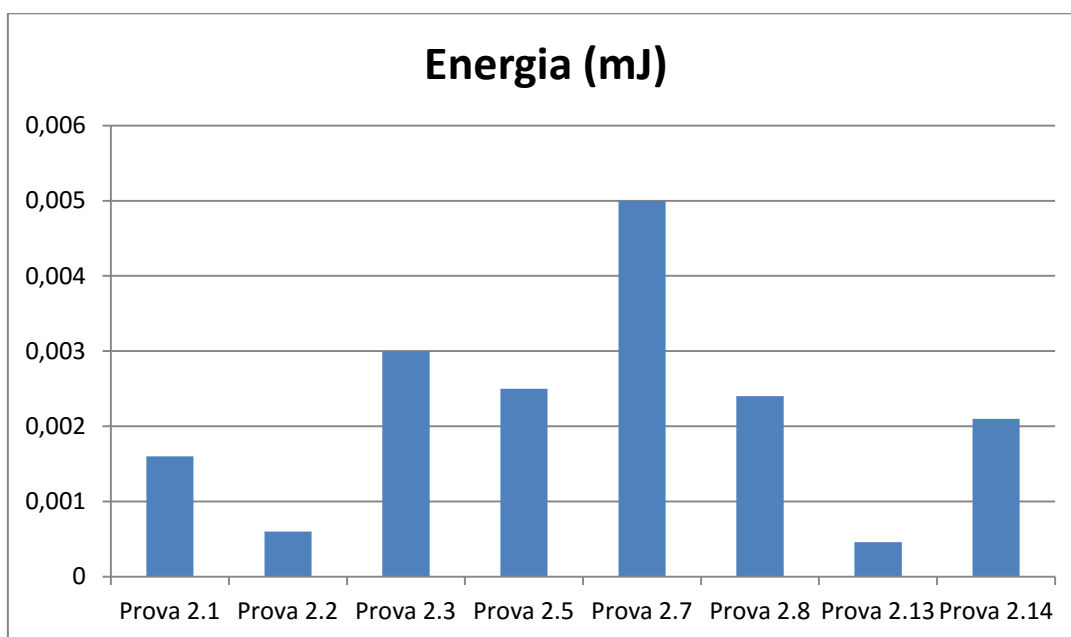


De la Gràfica 11.15 es pot extreure que el valor de la potència més gran aconseguida, per excitació, correspon a la Prova 2.7 i és de 0.012 mW.

Mentre que les proves que han donat menor resultat en quant a potència han estat les proves 2.2 i 2.13 amb una potència de 0.0015 mW.

La Gràfica 11.16 mostra els resultats de l'energia per excitació calculada en les diferents proves:

Gràfica 11.16. Comparativa d'energies obtingudes en el test amb piezoelèctric 1.

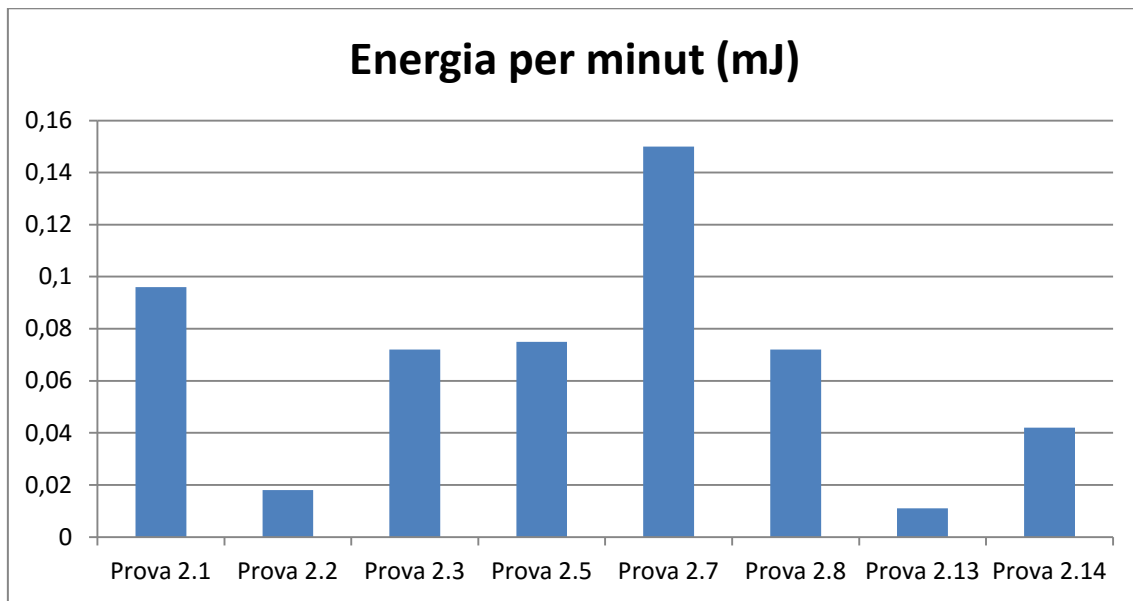


De la Gràfica 11.16 es pot extreure que els valors més grans d'energia per excitació es produeixen en la prova 2.7 amb un valor de 0.005 mJ, seguida de la prova 2.3 amb una energia de 0.003 mJ

Els valors d'energia més baixos es produeixen en les proves 2.2 i 2.13 amb uns valors de 0.0006 mJ i 0.0005 mJ respectivament.

La Gràfica 11.17 mostra la comparativa dels valors obtinguts d'energia per minut en les diferents proves:

Gràfica 11.17. Comparativa d'energies per minut obtingudes en el test amb piezoelèctric 1.



L'energia per minut més elevada es troba en la Prova 2.7 amb un valor de 0.15 mJ. Els valors més baixos d'energia capturada per minut són de 0.018 mJ a la prova 2.2 i de 0.011 mJ en la prova 2.13.

Del les gràfiques comparatives anteriors, es pot observar que la configuració que presenta més potència per excitació i millor energia capturada per minut és la configuració corresponent a la Prova 2.7.

11.4. Test amb piezoelèctric 2.

Per a l'execució d'aquest test s'han utilitzat dos piezoelèctrics connectats en sèrie. D'aquesta manera es preveu que el resultats obtinguts (en quant a energia i potència) siguin aproximadament el doble que els de l'anterior test efectuat.

El muntatge del dispositiu és el mateix que anteriorment, només canvia la manera de connectar el cables del piezoelèctric, ara es connecten els dos en sèrie.

En aquest test es repetiran les proves que han donat millors resultats a l'anterior test, però ara amb els dos piezoelèctrics.

Els paràmetres variables de la taula de proves seran iguals durant tot el transcurs del test número dos i també seran iguals que els emprats en el anterior test: $A = 500 \text{ mV}$; $f = 400 \text{ mHz}$.

11.4.1. Prova 4.1.

Els imants de la part mòbil del dispositiu s'han configurat de la manera següent: un imant situat a 180° del centre la massa, orientat de manera que s'atreu amb l'imant del piezoelèctric.

La Figura 11.21 es mostra la seva situació:

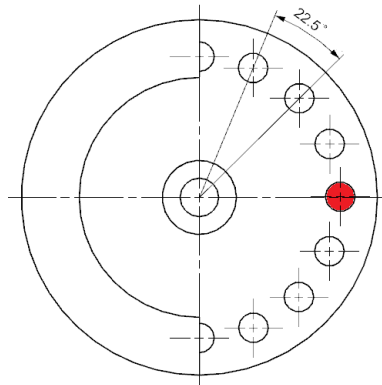
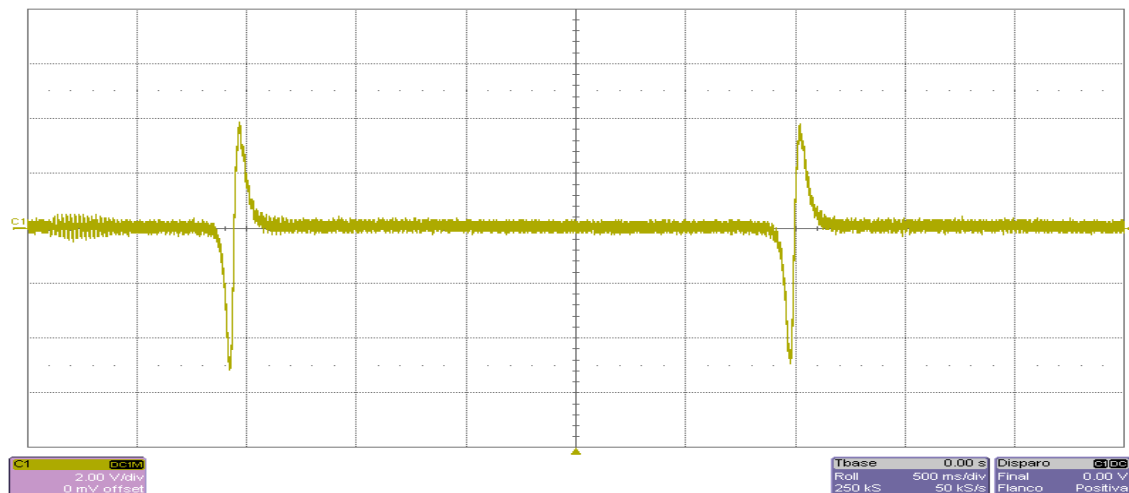


Figura 11.21. Configuració magnètica Prova 4.1.

La gràfica amb el resultats obtinguts durant la realització de la prova (Gràfica 11.18):

Gràfica 11.18. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 4.1.



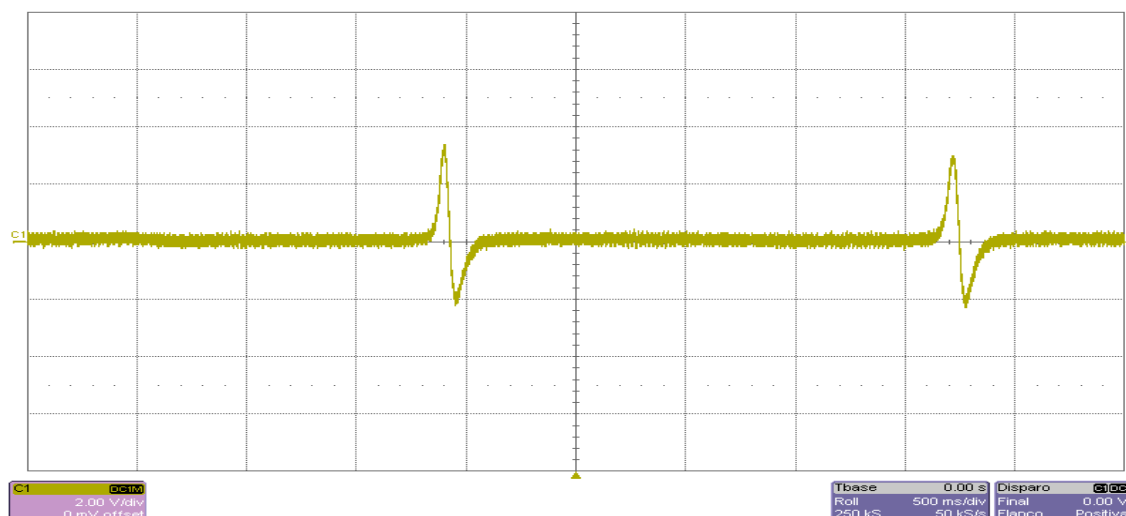
Al tenir connectats dos piezoelèctrics en sèrie la senyal obtinguda és del doble. El pics que s'obtenen en aquesta prova són de 5 V i 4 V, encara que entre excitacions transcorre un temps molt elevat (2.5 segons). Això és degut a una baixa velocitat de gir de la part mòbil.

11.4.2. Prova 4.2.

A la part mòbil s'ha fet una configuració igual que la de la Prova 1, però amb la diferència de la orientació de l'imant, en aquesta prova els imants de la part mòbil i el situat al piezoelèctric es repel·leixen.

Els resultats obtinguts són els següents (Gràfica 11.19):

Gràfica 11.19. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 4.2.



El temps que transcorre entre excitacions (2 segons) és semblant al de la Prova 4.1 (la configuració és la mateixa canviant el signe de l'imant).

En quant als pics de voltatge aconseguits són més baixos que l'anterior prova. El pic màxim de 2.8 V.

11.4.3. Prova 4.3.

Durant el transcurs de la Prova 4.3, el prototipus s'ha carregat amb els imants de la següent manera: tres imants consecutius orientats de manera que s'atreuen amb el del piezoelèctric (Figura 11.22):

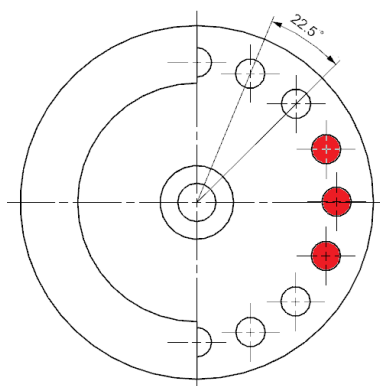
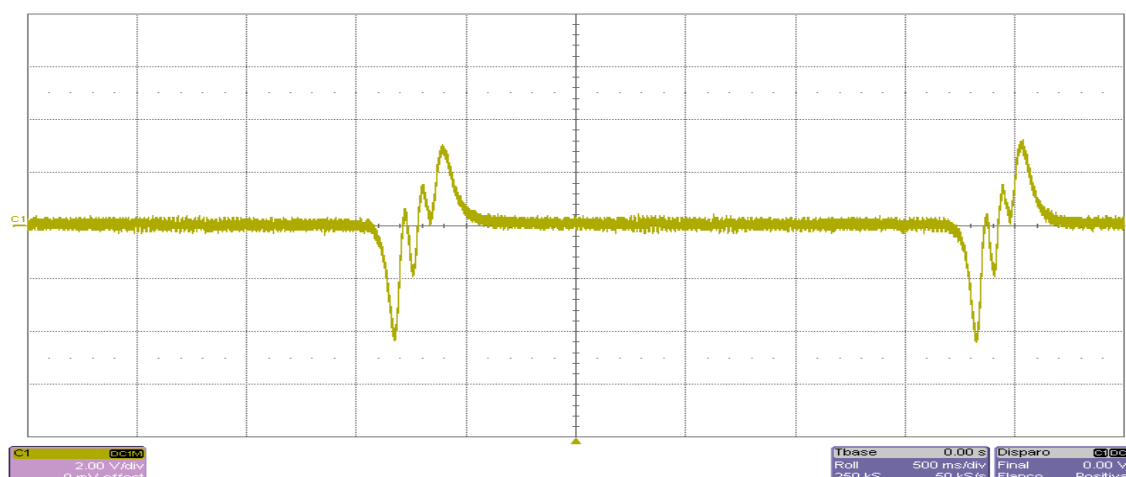


Figura 11.22. Configuració magnètica Prova 4.3.

La gràfica que mostra l'oscil·loscopi és la següent:

Gràfica 11.20. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 4.3.



La diferència principal d'aquesta prova respecte a les efectuades amb anterioritat és el creixement del temps de durada d'una excitació, degut a que a la configuració magnètica se li han afegit 2 imants més. El temps entre dues excitacions és 2 segons.

11.4.4. Prova 4.4.

La part mòbil del dispositiu s'ha configurat de la mateixa manera que en la prova anterior, però afegint-li dos imants més, un total de 5, amb la mateixa orientació (s'atreuen amb el del piezoelèctric). La part mòbil queda de la següent manera (Figura 11.23):

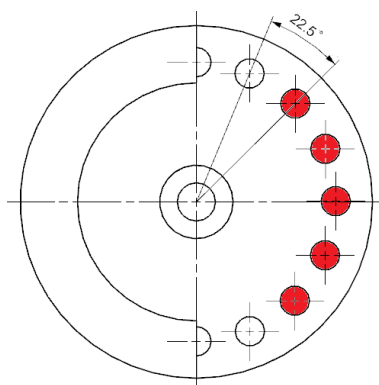
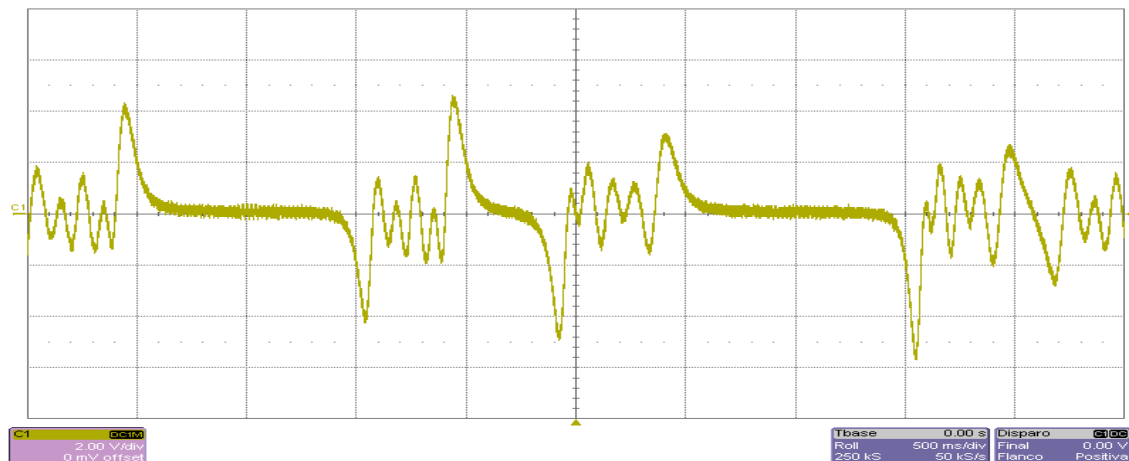


Figura 11.23. Configuració magnètica Prova 4.4.

Els resultats obtinguts són els següents (Gràfica 11.21):

Gràfica 11.21. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 4.4.



La gràfica obtinguda en la realització d'aquesta pràctica descriu una ona molt irregular. Aquesta circumstància és donada per la irregularitat del gir del disc i per la excessiva càrrega magnètica que fa que el piezoelèctric estigui pràcticament sempre en excitació.

11.4.5. Prova 4.5.

La configuració dels imants s'ha efectuat de la següent forma: un imant situat a 180° de la massa de la part mòbil, orientat de manera que es repel·leix amb el piezoelèctric; dos imants més a cada banda del primer imant orientats de manera que s'atreuen amb el piezoelèctric tots dos (Figura 4.5).

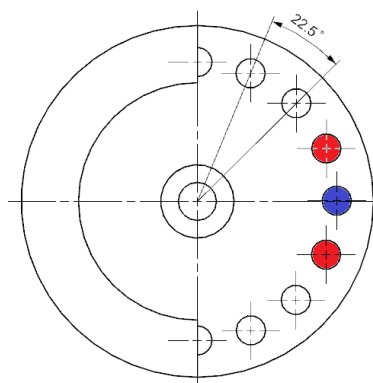
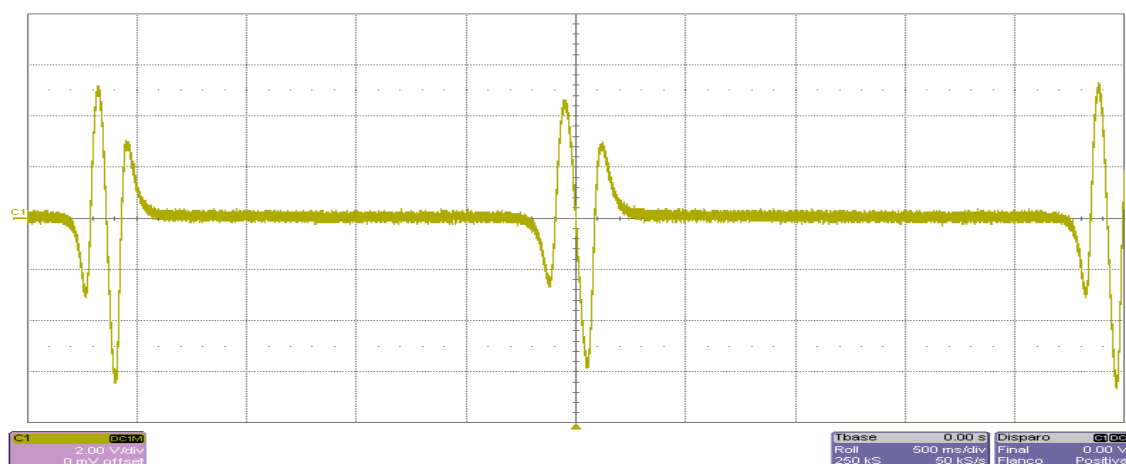


Figura 11.24. Configuració magnètica Prova 4.5.

Els resultats obtinguts amb l'oscil·loscopi es mostren a la gràfica següent (Gràfica 11.22):

Gràfica 11.22. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 4.5.



Els pics més alts aconseguits durant la prova són de 5 V. Les excitacions tenen una durada aproximada de 0.5 segons.

11.4.6. Prova 4.6.

La configuració dels imants és la següent: tres imants orientats en sentit que s'atreuen amb l'imant del piezoelèctric, i deixant un espai entre ells. La configuració es mostra a continuació a la Figura 11.25:

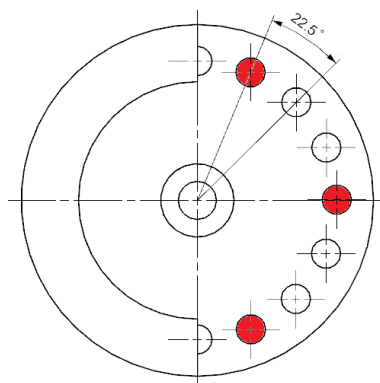
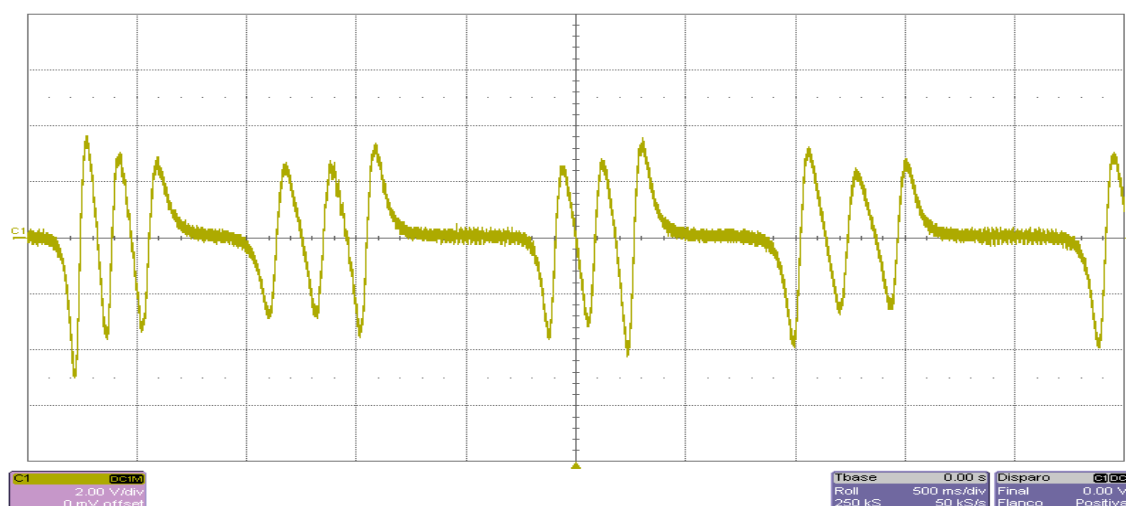


Figura 11.25. Configuració magnètica Prova 4.6.

La gràfica obtinguda és la següent (Gràfica 11.23):

Gràfica 11.23. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 4.6.



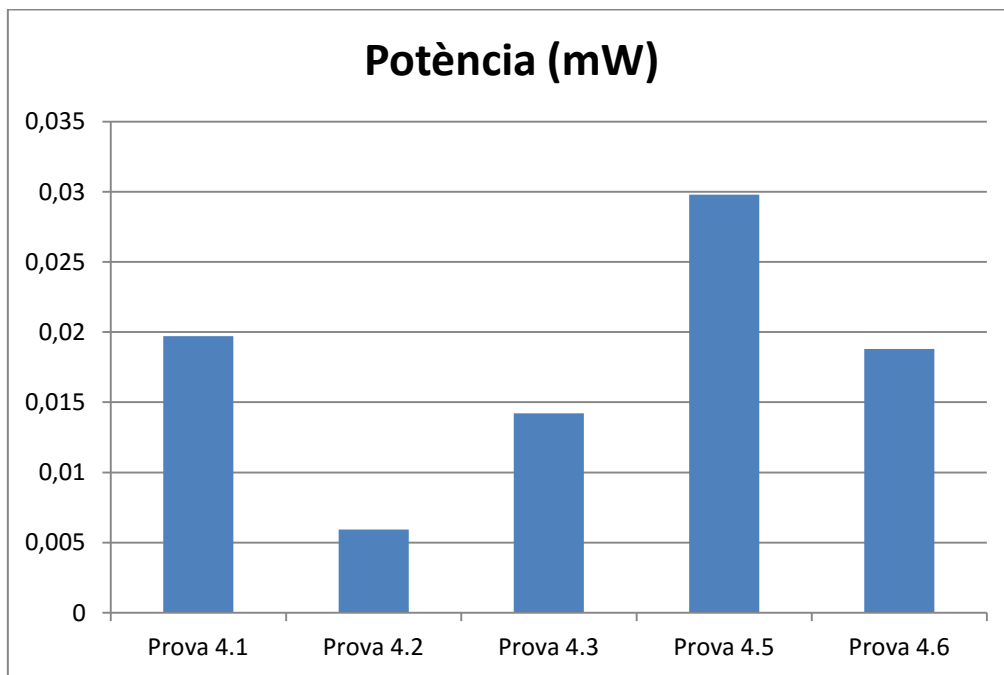
La ona obtinguda amb l'oscil·loscopi no mostra uns pics màxims molt grans, però la durada i la freqüència amb les que es produeixen les excitacions és bona.

11.5. Resultats test amb piezoelèctric 2.

Els resultats que es mostraran en aquest apartat han estat obtinguts seguint la mateixa metodologia que en l'apartat *test amb piezoelèctric 1*.

La Gràfica 11.24 mostra la comparativa de les potències obtingudes per a una excitació durant el transcurs del *test amb piezoelèctric 2*:

Gràfica 11.24. Comparativa de potències obtingudes en el test amb piezoelèctric 2.

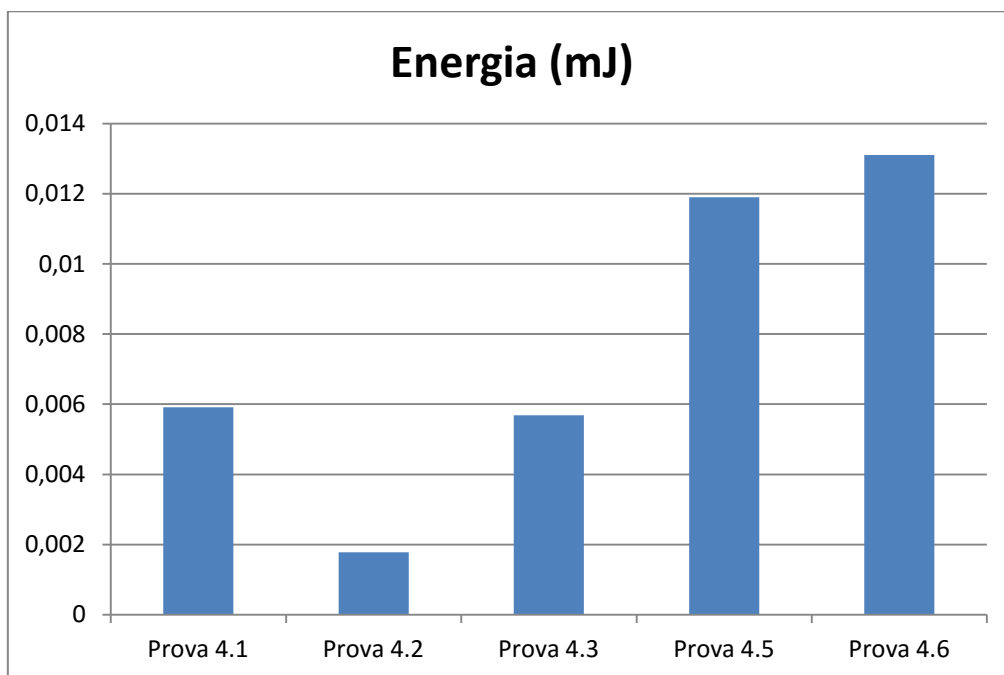


De la Gràfica 11.24 es pot extreure que la potència màxima obtinguda de totes les proves efectuades ha sigut la de la Prova 4.5 amb un valor de 0.03 mW per excitació. La segona potència més alta recollida ha sigut a la prova 4.1 amb un valor de 0.02 mW.

La configuració magnètica que ha donat menys resultat en quant a potència per excitació ha sigut l'obtinguda a la Prova 4.2 amb un valor de 0.006 mW.

La Gràfica 11.25 mostra la comparativa de les energies obtingudes durant una excitació a cada prova:

Gràfica 11.25. Comparativa d'energies obtingudes en el test amb piezoelèctric 2.

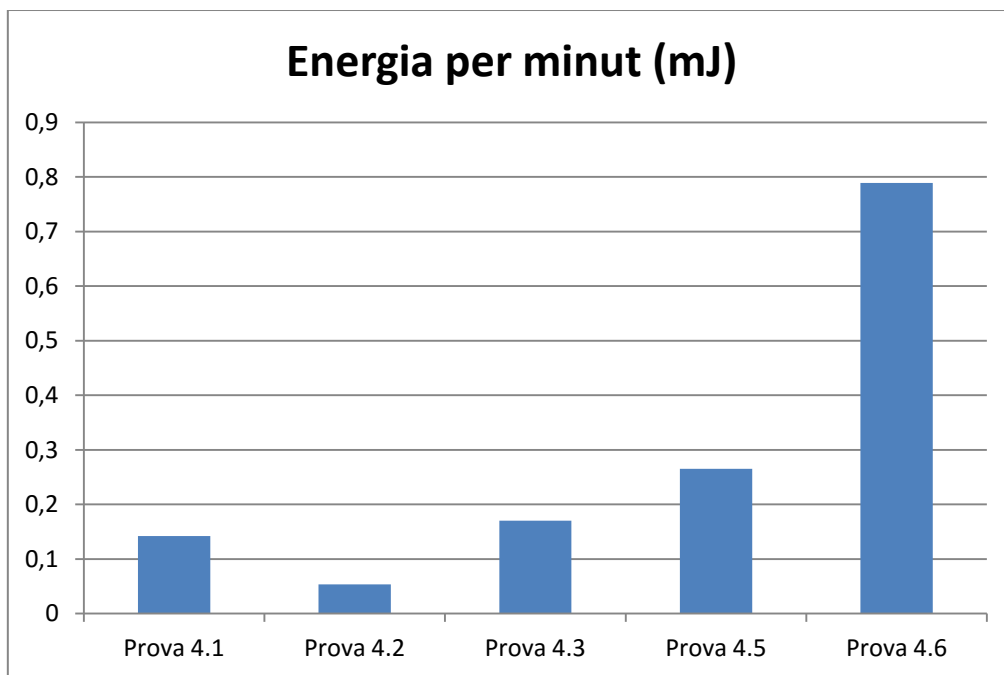


De la Gràfica 11.25 es pot observar que l'energia més gran obtinguda per excitació es produeix en la Prova 4.6 amb un valor de 0.013 mJ, seguida de l'energia obtinguda en la Prova 4.5 amb un valor 0.012 mJ.

L'energia més baixa obtinguda, de 0.0018 mJ, ha sigut obtinguda a la Prova 4.2.

En la Gràfica 11.26 es mostra l'energia capturada per minut en totes les proves efectuades en el test amb piezoelèctric 2:

Gràfica 11.26. Comparativa d'energies per minut obtingudes en el test amb piezoelèctric 2.



De la Gràfica 11.26 es pot extreure que l'energia per minut més gran es produeix a la Prova 4.6 amb un valor de 0.79 mJ, un valor molt allunyat dels altres valors obtinguts durant les diferents proves.

La diferència del valor de la Prova 4.6 respecte a les altres es deu a que gràcies a la seva configuració magnètica, el piezoelèctric s'excita durant llargs períodes de temps i, a més, entre excitacions transcorre molt poc temps. La configuració afavoreix el gir del disc.

De la resta de proves destaca la 4.5 amb un valor de 0.27 mJ.

La prova la qual s'ha obtingut un valor menor d'energia capturada per minut (0.053 mJ) ha sigut la Prova 4.2.

Comparant les energies i les potències obtingudes en les diferents proves, la configuració que presenta millors valors generals és la corresponent a la Prova 4.6. Aquesta configuració no és la que genera més potència per excitació, però si és la configuració que obté més energia capturada per minut.

La Prova 4.5 també ha donat bons resultats sent la configuració que dóna més potència per excitació i la segona en energia capturada per minut.

11.6. Test amb piezoelèctric 3.

Per la realització d'aquesta experimentació s'ha canviat la disposició dels imants sobre la part mòbil del dispositiu. En aquest test els imants de la part mòbil aniran en vertical igual que el imant situat al piezoelèctric. De manera que quan es trobin en la seva trajectòria ho faran cara a cara. La distància entre els imants, igual que a l'anterior test serà de 2 cm (Figura 11.26).

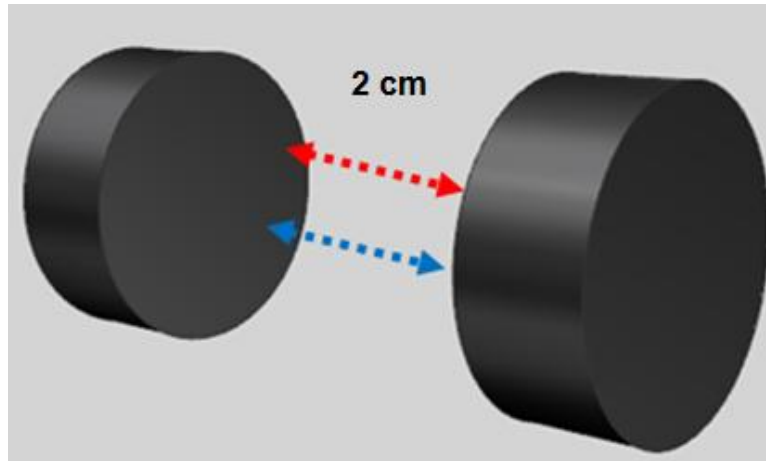


Figura 11.26. Nova disposició dels imants al prototipus.

Amb aquesta nova disposició dels imants de la part mòbil la superfície del camp magnètic serà major i es preveu aconseguir forces d'atracció o repulsió més grans i, per tant, més energia al aconseguir més excitació del piezoelèctric.

Els paràmetres que li seran donats a la taula de proves seran igual que en els dos anteriors test (Test amb piezoelèctric 1 i Test amb piezoelèctric 2):

Amplitud = 500 mV.

Freqüència = 400 mHz.

11.6.1 Prova 6.1.

En les següents proves efectuades s'han repetit algunes de les configuracions abans utilitzades, però amb la diferència de la disposició en la part mòbil dels imants.

La configuració de la part mòbil per aquesta prova és la següent: un imant situat a 180° de la massa orientat en sentit d'atracció amb l'imant del piezoelèctric, com es mostra la Figura 11.27:

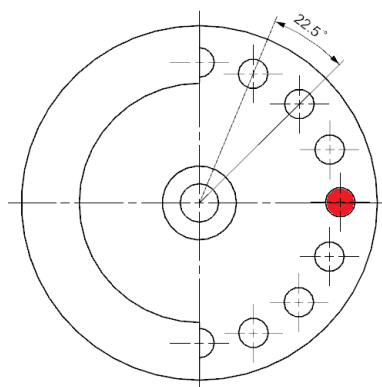
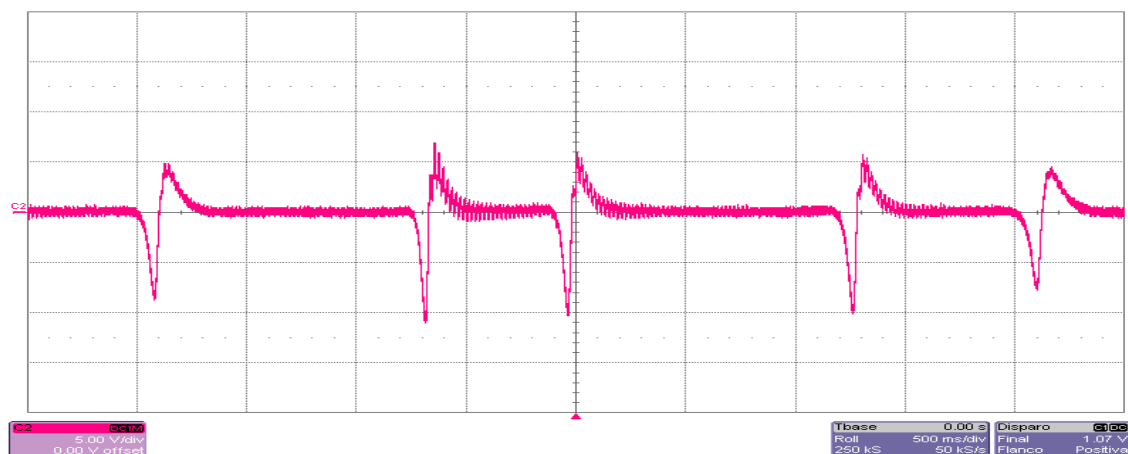


Figura 11.27. Configuració magnètica Prova 6.1.

Els resultats extrets de l'oscil·loscopi en la realització de la prova són el següents (Gràfica 11.27):

Gràfica 11.27. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 6.1.



Durant la realització de la prova s'ha pogut observar que el gir del disc no s'efectua d'una manera homogènia. La gràfica s'ha obtingut en un cert període on el gir s'efectuava en un mateix sentit i seguint una velocitat més o menys constant.

11.6.2. Prova 6.2.

La configuració de la part mòbil és idèntica a la configuració de la Prova 6.1, però amb l'imant orientat en sentit de repulsió a l'imant situat al piezoelèctric (Figura 11.28).

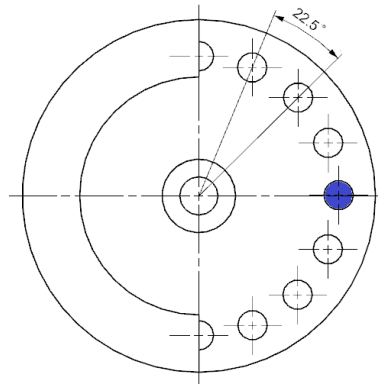
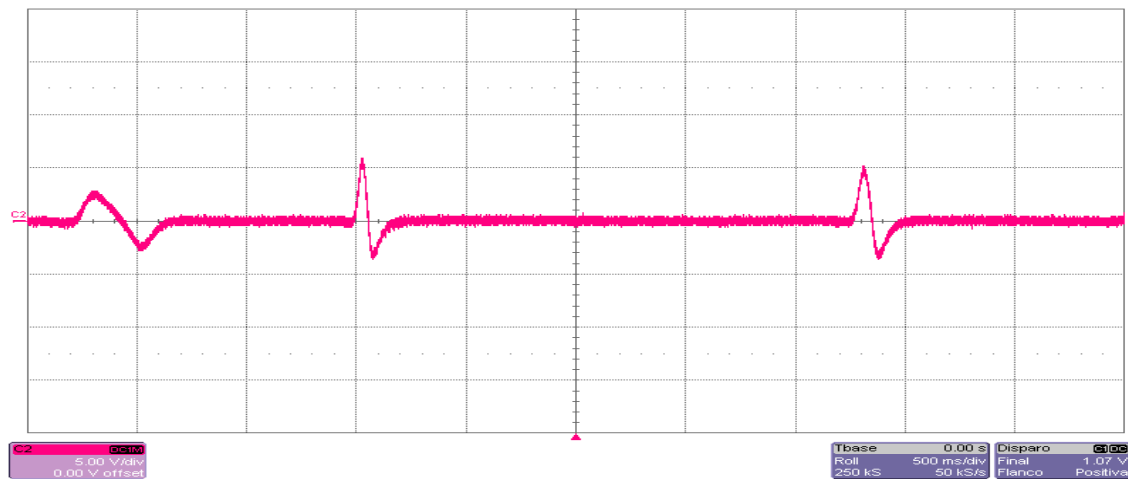


Figura 11.28. Configuració magnètica Prova 6.2.

Els resultats obtinguts en la realització de la Prova 6.2 són els següents:

Gràfica 11.28. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 6.2.



La configuració magnètica en aquesta prova (Gràfica 11.28) fa que les excitacions es produeixin en períodes molt separats entre ells i no totes les deformacions són de la mateixa magnitud.

11.6.3. Prova 6.3.

La configuració de la part mòbil per aquesta prova és la següent: un imant situat a 180° de la massa afegida orientat de manera que es repel·leix amb l'imant del piezoelèctric i dos imants més a cada banda del primer orientats en sentit que s'atreuen amb el piezoelèctric. La configuració es mostra a la Figura 11.29:

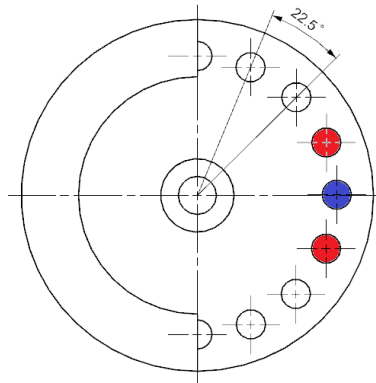
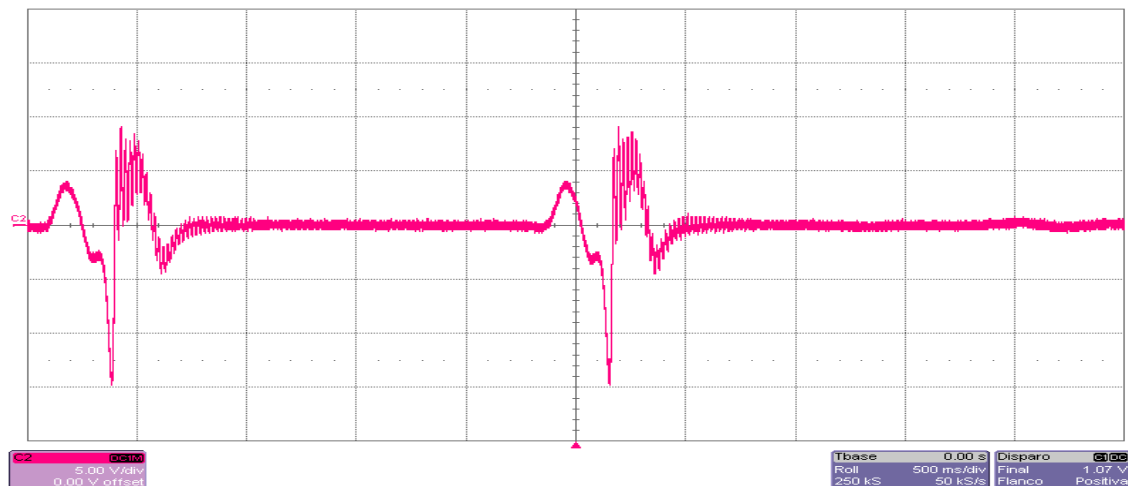


Figura 11.29. Configuració magnètica Prova 6.3.

Els resultats obtinguts amb l'oscil·loscopi són els següents:

Gràfica 11.29. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 6.3.



La forma de la Gràfica 11.29 és deguda a que els imants del disc, en arribar a l'alçada del piezoelèctric, canvien el sentit de gir.

Aquesta circumstància produeix també llargs períodes entre excitacions del piezoelèctric.

11.6.4. Prova 6.4.

Per la realització d'aquesta prova s'ha configurat la part mòbil del dispositiu de la següent manera: dos imants orientats de manera que es repel·leixen amb el del piezoelèctric i situats asimètricament al disc, es mostra a la Figura 11.30.

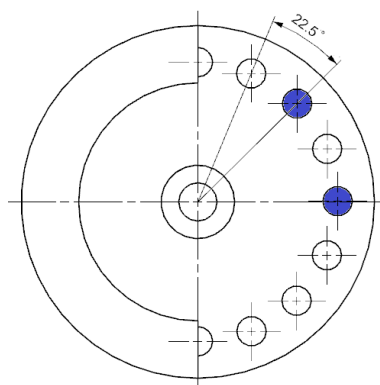
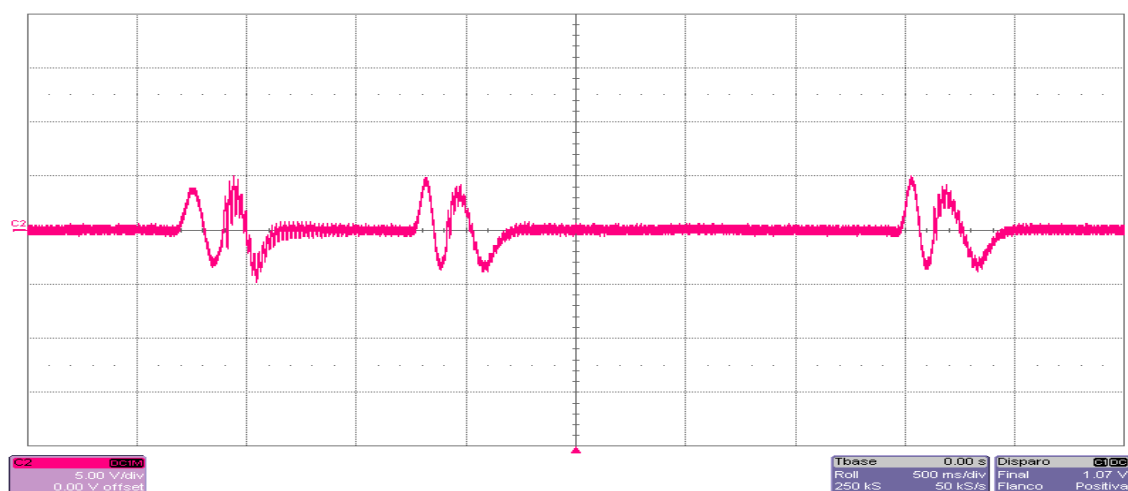


Figura 11.30. Configuració magnètica Prova 6.4.

Els resultats obtinguts de la prova són els següent (Gràfica 6.4):

Gràfica 11.30. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 6.4.



Igual que a succeït en les anteriors proves el gir que es produeix amb aquesta configuració no és òptim. Els girs no es produeixen de manera homogènia i, per tant, les excitacions del piezoelèctric no es donen de manera periòdica.

11.6.5. Prova 6.5.

En aquesta prova la part mòbil de dispositiu s'ha configurat de la següent manera: tres imants consecutius i deixant un espai entre ells, orientats en sentit que repel·leixen l'imant situat al piezoelèctric. Es mostra a la Figura 11.31.

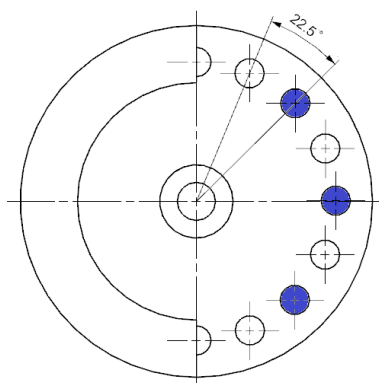
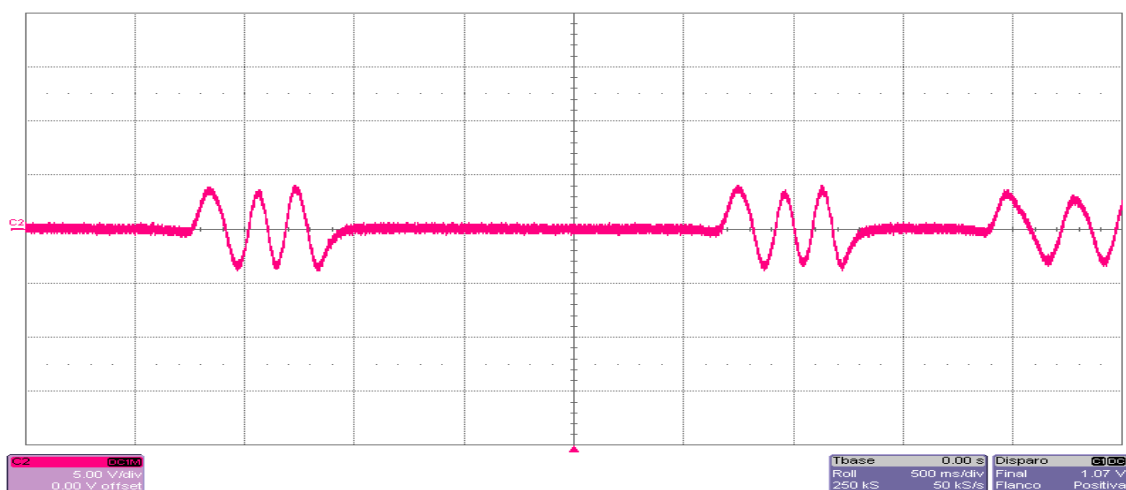


Figura 11.31. Configuració magnètica Prova 6.5.

Els resultats obtinguts en la realització de la prova són els següents (Gràfica 11.31):

Gràfica 11.31. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 6.5.



La realització de la Prova 6.5 tampoc ha donat resultats positius. Com es pot observar a la Gràfica 11.31 les deformacions del piezoelèctric no es produeixen seguint un període constant.

11.7. Resultats test amb piezoelèctric 3.

En els resultats obtinguts en el transcurs de les diferents proves del test amb piezoelèctric 3 no es poden obtenir resultats d'energia capturada per minut degut a la uniformitat en el temps entre excitacions.

En quant a la potència obtinguda per excitació si que es pot observar a les gràfiques obtingudes que si que serà més gran que en els anteriors test amb piezoelèctric efectuat. Els pics de voltatge obtinguts van de 5 V a 10 V (més del doble que en els anteriors test).

Malgrat la millora en la potència obtinguda respecte en les anteriors proves, els resultats obtinguts en aquest test no seran considerats com a vàlids degut a la dificultat que presenta la part mòbil del prototipus per efectuar girs.

11.8. Resultats obtinguts en els tests amb piezoelèctric.

De les probes i els resultats obtinguts en els apartats 11.2. *Test amb piezoelèctric 1* i 11.4 *Test amb piezoelèctric 2*, es pot observar que la millor configuració és la corresponent a la Prova 2.7 del primer test, i la corresponent a la Prova 4.5., havent coincidència en les seves configuracions.

Les dues configuracions magnètiques de les dues proves són la mateixa (Figura 11.32) amb la diferència que en la Prova 4.5 hi ha dos piezoelèctrics connectats en sèrie.

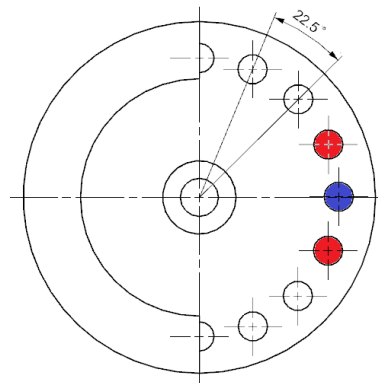


Figura 11.32. Configuració magnètica Prova 2.7 i Prova 4.5.

En la Taula 11.9 es poden observar els resultats obtinguts en les dues proves comparats:

Taula 11.9. Comparativa resultats Prova 2.7 i Prova 4.5.

Prova	Potència per excitació (mW)	Energia per excitació (mJ)	Energia per minut (mJ)
Prova 2.7	0.012	0.005	0.15
Prova 4.5	0.03	0.012	0.27

Segons la teoria, al connectar dos piezoelèctrics en sèrie els resultats obtinguts han de ser el doble que amb només un piezoelèctric.

En la Taula 11.9 es pot observar que el valors no són del doble, però són molt propers.

En conclusió es pot dir que la configuració Prova 4.5 és la que millors resultats s'han obtingut.

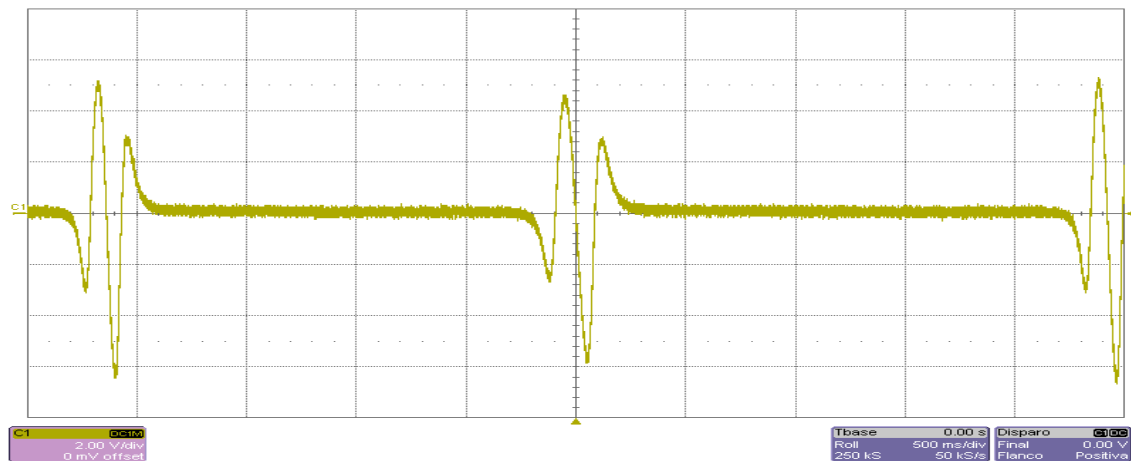
L'apartat 10.5.7. *Tests amb piezoelèctric 3* no s'ha pogut comparar amb els altres dos degut a les dificultats observades en el gir de la part mòbil que feien que el disc no girés sempre en un mateix sentit i a una velocitat més o menys constant. Inclòs depenent de la configuració empleada el disc arribava a aturar-se per complet.

Les potències obtingudes amb la nova disposició dels imants eren més grans que als anteriors test però les dificultats en girar fan que l'energia capturada per minut sigui molt baixa.

11.8.1. Comparació resultats amb deformació del piezoelèctric per xoc.

La configuració escollida del prototipus, corresponent a la Prova 4.5 presenta uns valor representats a la Figura 10.73:

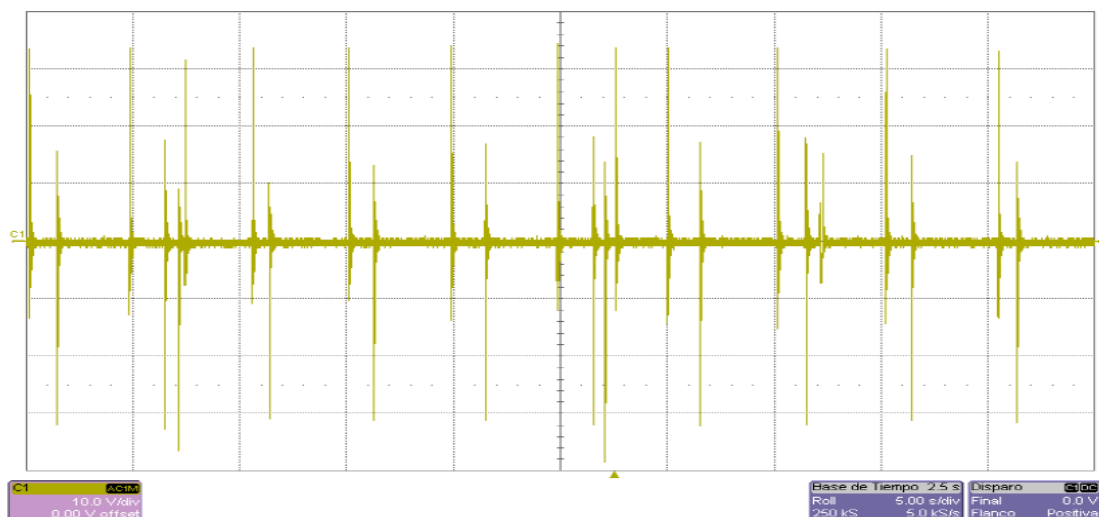
Gràfica 11.32. Gràfica descrita per l'oscil·loscopi en la Prova 4.5.



La Gràfica 11.32 correspon a la gràfica obtinguda amb l'oscil·loscopi en una de les proves del Projecte de Fi de Grau de Jordi Vidal Rubio ("Disseny, Construcció i experimentació d'un prototipus de col·lector d'energia a partir de l'onatge marí mitjançant piezoelèctrics de vibració").

Com s'ha descrit prèviament en el apartat 3.4. *Col·lector d'energia mitjançant piezoelèctrics de vibració*, la deformació dels piezoelèctrics es fa mitjançant el xoc amb unes pues situades al pèndol.

Gràfica 11.33. Gràfica obtinguda en el projecte "Disseny, Construcció i experimentació d'un prototipus de col·lector d'energia a partir de l'onatge marí mitjançant piezoelèctrics de vibració".



Comparant els resultats de les gràfiques obtingudes es pot observar que els pics aconseguits en la Gràfica 11.33 arriben a 34 V, mentre que els resultats obtinguts en la Gràfica 11.32 arriben a un valor de 5 V.

Per tant, es pot observar que els resultats obtinguts en excitar el piezoelèctric per xoc, són més gran que en excitar el piezoelèctric per forces magnètiques.

Malgrat aquesta evident disminució de la potència obtinguda en excitar el piezoelèctric per forces magnètiques, respecte a l'excitació de xoc, segons l'apartat 3.4. *Col·lector d'energia mitjançant piezoelèctrics de vibració*, la mínima energia vàlida per a un col·lector que alimenta dispositius de baixa densitat és de 1 mW.

Si es compara el 1 mW vàlid, amb la potència obtinguda de 0.03 mW aconseguida en aquest Treball de Fi de Grau no són valors molt allunyats i s'han de tenir en compte les reduïdes dimensions del dispositiu i només la utilització de dos piezoelèctrics.

En quant a la comparació de l'energia capturada per minut dels dos dispositius no es poden comparar degut a les diferents metodologies utilitzades i les diferents dimensions dels prototipus.

12. Conclusions.

Les diferents conclusions extretes en el desenvolupament del projecte seran dividides en tres apartats:

1. Estudi de millora del gir pèndol.
2. Estudi de la deformació del piezoelèctric en ser excitat per forces magnètiques.
3. Possibles millores en vistes a futurs projectes relacionats.

En quant a l'estudi de la millora del gir del pèndol, que s'ha efectuat fent servir la força magnètica d'imants i provant diferents configuracions al dispositiu, no s'han pogut observar resultats positius. És a dir, no s'ha observat una millora visible ni en la homogeneïtat del gir del pèndol (girs complets en un mateix sentit) ni un augment en la velocitat de gir en els tests efectuats.

Les proves realitzades per veure el comportament del piezoelèctric en ser excitat per les forces magnètiques han sigut més positius. Al llarg de les proves es demostra que la deformació produïda pels imants produeix energia. Les experimentacions d'aquest estudi han estat realitzades a la taula de proves amb unes condicions que simularien una mar gruixuda.

Els resultats demostren que els valors obtinguts, en quant a pics de voltatge, són inferiors als realitzats en anteriors projectes que en el piezoelèctric era deformat per xoc, però s'intueix que a la llarga el desgast dels piezoelèctrics podria ser inferior amb aquest nou mètode de deformació.

En vistes a futurs projectes a realitzar seguint la línia de treball d'aquest estudi es fan les següents recomanacions:

- Dissenyar i construir un nou prototipus que pugui estar més a prop d'un hipotètic muntatge final. El present dispositiu dissenyat no tindria les dimensions finals requerides (al ser el dispositiu efectuat per a un estudi preliminar) i, per tant, les dades obtingudes podrien variar en canviar les dimensions.
- Provar les configuracions magnètiques en condicions que simulin més fidelment els moviments reals del mar al qual finalment anirà allotjat l'enginy. Les condicions en les quals s'han efectuat els test amb piezoelèctric de mar gruixuda poder no serien les més habituals.

13. Bibliografia.

Llibres:

Basagni, S., Naderi, M.Y., Petrioli C., and Spenza, D. Chapter 1: "Wireless sensor networks with energy harvesting", In S. Basagni, M. Conti, S. Giordano, and I. Stojmenovic, editors, *Mobile Ad Hoc Networking: Cutting Edge Directions*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2013. Capítol 1 disponible en:

<http://www1.ece.neu.edu/~naderi/papers/EHWSN-Book-Chapter.pdf>

[Data de consulta: Desembre, 2015]

MILLS, G.F.; *Electricidad, teoria de circuitos i magnetismo*. Universitat Politècnica de Catalunya: 2010.

SPIEGEL, M.R; *Mecànica teórica*. McGraw Hill, 1977

TIPLER, P.A., MOSCA, G.; *Física para la ciencia i la tecnología. 6a edición*. Reverte: 2010

Projectes:

PIQUET BERNET, Ferran; *Disseny i caracterització d'un col·lector d'energia giratori amb piezoelèctrics d'excitació per vibració a l'observatori OBSEA*. UPC, Vilanova i la Geltrú: Projecte Final de Grau, 2014.

PUJOL BRESCÓ, David; *Estudi experimental d'un captador d'energia marina per aplicacions de baixa potència mitjançant piezoelèctrics d'impacte*. UPC, Vilanova i la Geltrú: Projecte Final de Grau, 2013

SEPÚLVEDA OROZCO, Esteban; *Disseño de un colector de Energía Piezoelétrico (Energy Harvesting) mediante optimización topológica que maximice la transformación de energía mecánica en eléctrica generada por un ser humano al caminar*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2014.

VIDAL RUBIO, Jordi; *Disseny, construcció i experimentació d'un prototipus de col·lector d'energia a partir de l'onatge marí mitjançant piezoelèctrics de vibració*. UPC, Vilanova i la Geltrú: Projecte Final de Grau, 2014.

Articles:

ABDELKEFI, A., "Aeroelastic energy harvesting: A review", *International Journal of Engineering Science*, 100, 2016, pp.112–13. [Disponible online:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020722515001482>]

BOUENDEU, E., GREINER, A., SMITH, P.J., KORVINK, J.G.; "An efficient low cost electromagnetic vibration harvester". *PowerMEMS*, Washington DC, USA, December 1-4, 2009, pp.320-323 [Diponible online

http://cap.ee.ic.ac.uk/~pdm97/powermems/2009/pdfs/papers/083_0081.pdf]

HÄGGSTROM, F., GUSTAFSSON, J., DELSING, J.; "Energy harvesting technologies for wireless sensors in rotating environments". *IEE Emerging Technology and Factory Automation (EFTA)*, 2014, [Disponible en: http://www.academia.edu/11704929/Energy_harvesting_technologies_for_wireless_sensors_in_rotating_environments]

LI, M., WEN, Y., LI, P., YANG, J.; "A resonant frequency self-tunable rotation energy harvester based on magnetoelectric transducer". *Sensors and actuators A: Physical*, 194, 2013, pp.16-24 [Disponible en:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424713000472>]

MEDINA, C., VELAZCO, S., SALINAS, J.; "Control experimental del modelo de péndulo matemático". *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol.24, no. 2, Juny 2002, pp. 254-258 [Disponible en: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-11172002000200023&script=sci_arttext]

PARK, Y., KANG, H., WERELEY, N.; "Conceptual design of rotatory magnetostrictive energy harvester". *Journal Applied Physics*, 115, 17E7313, 2014 [Disponible en: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/115/17?ver=pdfcov>]

SHAIKH, F.K., ZEDADALLY, S., "Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 2016, pp.1041–1054 [Disponible en:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115012629>]

WANG, L., YUAN, F., "Structural vibration energy harvesting by magnetostrictive materials (Msn)". Te Proceeding 4th China-Japan Symposium on Structural Control and Monitoring, Octubre 2006 [Disponible en: www.mae.ncsu.edu/ssml/.../Wang_SMS_2008.pdf]

XIE, X.D., WANG, Q., WU, N.; "A ring piezoelectric energy harvester excited by magnetic forces" *International Journal of Engineering Science* 77, 2014, pp.71-78 [Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020722514000020>]

Adreces web:

AW-ENERGY; *WaveRoller. Plug into water energy* [en línia]. Finlàndia. Disponible en: <http://aw-energy.com/> [Data de consulta: Octubre, 2015]

BIOPOWER SYSTEMS; *bioWave* [en línia]. Australia. Disponible en: <http://www.biopowersystems.com/biowave.html> [Data de consulta: Octubre, 2015]

OBSEA; *Expandable seafloor observatory* [en línia]. Universitat Politècnica de Catalunya. Disponible en: <http://www.upc.edu/cdsarti/OBSEA/> [Data de consulta: Setembre, 2015]

Piezoelectricity: the free encyclopedia [Wiki en internet]. Wikimedia Foundation, Inc. 2013 [Consulta de Decembre de 2015]. Diponible en: <https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity>

TEAMWORK TECHNOLOGY; *Archimedes Wave Swing* [en línia]. Holanda. Disponible en: <http://www.teamwork.nl/en/portfolio/project/archimedes-wave-swing> [Data de consulta: Octubre, 2015]